



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISIS STABILITAS TRANSIEN DAN MEKANISME
PELEPASAN BEBAN PADA SISTEM KELISTRIKAN PT.
VALE**

Chandra Tamorron Musu
NRP 2215105081

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Ir. Sjamsjul Anam, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

Transient Stability Analysis and Load Shedding on Electrical System PT. Vale

Chandra Tamorron Musu
NRP 2215105081

Advisor
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Ir. Sjamsjul Anam, MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Analisis Stabilitas Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban pada Sistem Kelistrikan PT. Vale”** adalah benar-benar hasil karya mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2016

Chandra Tamorron Musu
NRP. 2215 105 081

**ANALISIS STABILITAS TRANSIEN DAN MEKANISME
PELEPASAN BEBAN PADA SISTEM
KELISTRIKAN PT. VALE**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

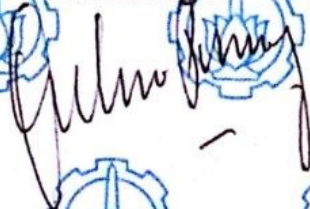
Pada

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro**

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
NIP. 19490727151974121001

Dosen Pembimbing II



Ir. Sjamsjul Anam, M.T.
NIP. 196307251990031002



Transient Stability Analysis and Load Shedding on Electrical System PT. Vale

Nama : Chandra Tamorron Musu
NRP : 2215 105 081
Dosen Pembimbing 1 : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M. Sc., Ph.D.
Dosen Pembimbing 2 : Ir. Sjamsjul Anam, MT.

ABSTRACT

PT. Vale Indonesia is a leading nickel company in the world. Electrical system at PT. Vale Indonesia is divided into two grids: Furnice grid (for supplying electric kilns) and Auxiliary grids (for supplying electricity requirements other than electric kiln) interconnected using dc link. During conducting research in the field found that at PT. Vale Indonesia is no longer using the automatic load shedding. In this final project is performed stability analysis including voltage stability, frequency stability and rotor angle stability during short circuit, motor starting and generator outage. In the case of a short circuit at a voltage level of 3.3 kV that is on bus R6 after the isolated disturbance (CB open) the voltage on the 11kV bus changes from 100.4% to 101.9%. As for the short circuit at 11kV voltage level after isolated disturbance (CB 13 open) the voltage at 150 kV on the Auxiliary grid changed from 100.483% to 102.3%. In the case of the starting motor the voltage on the 11kV bus drops from 100.77% to 100,117%. In the case of short circuit and motor starting does not give a significant impact on the voltage and frequency on the grid Furnace. In the case of the outage of two generators Balambano # 1 and Balambano # 2 the frequency on the grid Furnice down to the frequency of 70,41% while on the grid Auxiliary frequency 99.9682%. By interconnection using dc link disturbance due to release of the generator on the grid Furnice will not give a significant effect on the Auxiliary grid so that the automatic load release mechanism on the Auxiliary grid is no longer needed.

Kata kunci : *Transient stability, transient disturbance, dc link.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Analisis Stabilitas Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban pada Sistem Kelistrikan PT. Vale

Nama : Chandra Tamorron Musu
NRP : 2215 105 081
Dosen Pembimbing 1 : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M. Sc., Ph.D.
Dosen Pembimbing 2 : Ir. Sjamsjul Anam, MT.

ABSTRAK

PT. Vale Indonesia adalah perusahaan penghasil nikel terkemuka di dunia. Sistem kelistrikan pada PT. Vale Indonesia dibagi menjadi dua grid yaitu grid Furnace (untuk menyuplai tanur peleburan) dan grid Auxiliary (untuk menyuplai kebutuhan listrik selain tanur peleburan) yang diinterkoneksi menggunakan dc link. Selama melakukan penelitian di lapangan didapatkan bahwa pada PT. Vale Indonesia saat ini tidak lagi menggunakan mekanisme pelepasan beban secara otomatis. Pada tugas akhir ini dilakukan analisis kestabilan meliputi kestabilan tegangan, kestabilan frekuensi dan kestabilan sudut rotor saat terjadi hubung singkat, *motor starting* dan *generator outage*. Pada kasus hubung singkat pada level tegangan 3,3 kV yaitu pada bus R6 setelah gangguan terisolir (CB open) tegangan pada bus 11kV berubah dari 100,4% menjadi 101,9%. Sedangkan untuk hubung singkat pada level tegangan 11 kV setelah gangguan terisolir (CB 13 open) tegangan pada 150 kV pada grid Auxiliary berubah dari 100,483% menjadi 102,3%. Pada kasus motor starting tegangan pada bus 11kV turun dari 100,77% menjadi 100,117%. Pada kasus hubung singkat dan motor starting tidak memberikan dampak yang berarti pada tegangan dan frekuensi pada grid Furnace. Pada kasus lepas dua buah generator yaitu Balambano#1 dan Balambano#2 frekuensi pada grid Furnace turun sampai frekuensi 70,41% sedangkan pada grid Auxiliary frekuensi 99,9682%. Dengan interkoneksi menggunakan dc link gangguan akibat lepasnya generator pada grid Furnace tidak akan memberikan pengaruh yang berarti pada grid Auxiliary sehingga mekanisme pelepasan beban secara otomatis pada grid Auxiliary tidak diperlukan lagi.

Kata kunci :kestabilan transien, gangguan transien, *dc link*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan atas Kasih dan Karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul: **“Analisis Stabilitas Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban pada Sistem Kelistrikan PT. Vale ”**

Pembuatan dan penyusunan Tugas Akhir ini diajukan sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi Strata-1 (S1) pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga departemen Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yesus Kristus akan karunia yang diberikan kepada penulis, baik pada penulisan ini, penempuhan studi dan kehidupan sehari-hari.
2. Orang tua, kakak-kakak dan adik yang telah banyak memberikan motivasi dan senantiasa memberikan doa yang tiada hentinya.
3. Bapak Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, S.T., M.sc, Ph.D. dan Bapak Ir. Sjamsjul Anam, MT. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran serta bimbingan.
4. Semua pegawai PT. Vale Indonesia yang telah banyak membantu selama pengambilan data perusahaan.
5. Semua dosen Teknik Elektro ITS yang memberikan banyak ilmu selama perkuliahan.
6. Teman kuliah dan teman kos yang selalu membantu.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih memiliki banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan masukan sangat diharapkan untuk perbaikan dimasa yang akan datang.

Surabaya, Juni 2017

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	1
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Metodologi.....	2
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II DASAR TEORI	5
2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik.....	5
2.1.1 Kestabilan Sudut Rotor	5
2.1.2 Kestabilan Frekuensi	9
2.1.3 Kestabilan Tegangan	9
2.2 Kestabilan Transien.....	9
2.3 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan	11
2.4 HVDC Transmission	13
2.5 Back-to Back HVDC.....	17
2.6 Sistem Pengoperasian Load Shedding	17

2.6.1 Pelepasan Beban Secara Manual.....	19
2.6.2 Pelepasan Beban Secara Otomatis.....	19
2.7 <i>Standar yang Digunakan untuk Analisis Kestabilan Transien.</i>	20
2.7.1 Standar Frekuensi untuk <i>Hydraulic turbine</i> (IEEE Std C37.106-2003)	20
2.7.2 Standar Tegangan.....	20
2.7.3 Standar Pelepasan Beban	21
BAB III SISTEM KELISTRIKAN PT. VALE INDONESIA	23
3.1 <i>Metode Pelaksanaan Studi</i>	23
3.2 <i>Sistem kelistrikan di PT Vale Indonesia</i>	24
3.3 <i>Data Kelistrikan di PT Vale Indonesia</i>	24
3.3.1 Sistem Pembangkitan	24
3.3.2 Sistem Distribusi	26
3.3.3 Data Beban.....	28
3.3.4 Data Load Flow.....	29
3.4 <i>Data Kontrol Generator PT. Vale Indonesia</i>	29
3.4.1 Model <i>Exciter</i>	29
3.4.2 Model Governor.....	31
3.5 <i>HVDC</i>	31
BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI PT. VALE INDONESIA	33
4.1 <i>Pemodelan Sistem Kelistrikan PT. Vale Indonesia</i>	33
4.2 <i>Total Pembangkitan dan Beban PT. Vale Indonesia</i>	33
4.3 <i>Studi Kasus Analisa Transien</i>	33
4.4 <i>Simulasi dan analisis kestabilan transien</i>	36
4.4.1 Simulasi kestabilan transien untuk kasus hubung singkat (<i>Short Circuit</i>).....	36
4.4.1.1 <i>Studi Kasus Hubung Singkat pada bus 3,3 kV</i>	36

4.4.1.2 <i>Studi Kasus Hubung Singkat pada bus 11 kV</i>	38
4.4.2 Simulasi kestabilan transien dengan kasus motor starting.	40
4.4.2.1 <i>Studi kasus motor starting 3500 HP</i>	40
4.4.3 Simulasi kestabilan transien untuk kasus <i>generator outage</i>	41
4.4.3.1 <i>Studi kasus lepas generator Larona#2</i>	42
4.4.3.2 <i>Studi kasus lepas generator Balambano#1 dan Balambano#2</i>	44
4.4.4 Simulasi kestabilan transien dengan kasus <i>generator outage</i> dengan interkoneksi grid Furnace dan grid Auxiliary menggunakan trafo	46
BAB V PENUTUP	49
5.1 <i>Kesimpulan</i>	49
5.2 <i>Saran</i>	50
DAFTAR PUSTAKA	51
BIOGRAFI	A-1
LAMPIRAN	B-1

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

TABLE OF CONTENTS

TITLE

AUTHENTICITY SHEET

APPROVAL SHEET

ABSTRACT.....i

ABSTRACT.....Error! Bookmark not defined.

PREFACE.....Error! Bookmark not defined.

TABLE OF CONTENTS.....Error! Bookmark not defined.

LIST OF FIGURESError! Bookmark not defined.

LIST OF TABLE.....Error! Bookmark not defined.

CHAPTER I INTRODUCTIONError! Bookmark not defined.

1.1 Background..... 1

1.2 Problems..... 1

1.3 Limitation of Problems 2

1.4 Research Objectives 2

1.5 Methodology 2

1.6 Systematic of Report Writing 3

BAB II BASIC THEORY5

2.1 Power System Stability 5

2.1.1 Rotor Angle Stability..... 5

2.1.2 Frequency Stability 9

2.1.3 Voltage Stability 9

2.2 Transient Stability 9

2.3 Rotor Dynamics and The Swing Equation 11

2.4 HVDC Transmission..... 13

2.5 Back-to Back HVDC..... 17

2.6 Operating System Load Shedding..... 17

2.6.1 Load Shedding Manually.....	19
2.6.2 Automatic Load Shedding.....	19
2.7 Standarts Used for Transient Stability Analysis.....	20
2.7.1 Standard Frequency for Hydraulic turbine (IEEE Std C37.106-2003).....	20
2.7.2 Voltage Standard.....	20
2.7.3 Standard Load Shedding.....	21
BAB III ELECTRICAL SYSTEM PT. VALE INDONESIA.....	23
3.1 Method of Study Implementation.....	23
3.2 Electrical System PT. Vale Indonesia.....	24
3.3 Electrical Data at PT. Vale Indonesia.....	24
3.3.1 Generation System.....	24
3.3.2 Distribution System	26
3.3.3 Load Data	28
3.3.4 Load Flow Data	29
3.4 Data Control Generator PT. Vale Indonesia.....	29
3.4.1 Exciter Model.....	29
3.4.2 Governor Model.....	31
3.5 HVDC.....	31
BAB IV SIMULATION AND ANALYSIS OF TRANSIENT STABILITY IN PT. VALE INDONESIA	33
4.1 Electrical System Modeling PT. Vale Indonesia.....	33
4.2 Total Generation and Load PT. Vale Indonesia	33
4.3 Case Study of Transient Analysis.....	33
4.4 Simulation and Analysis of transient stability.....	36
4.4.1 Simulation of transient stability for short circuit case	36
4.4.1.1 Case Study for Short Circuit on bus 3,3 kV.....	36
4.4.1.2 Case Study for Short Circuit on bus 11 kV.....	38

4.4.2 Simulation of Transient Stability in Case of Starting Motor.....	40
4.4.2.1 Case study motor starting 3500 HP.....	40
4.4.3 Simulation of Transient Stability for Outage Generator Case.....	41
4.4.3.1 Case Study for Generator Larona#2 Outage.....	42
4.4.3.2 Case Study for Generator Balambano#1 and Balambano#2 Outage	44
4.4.4 Simulation of transient stability in case of outage generator with grid interconnection Furnace and Auxiliary grid using transformer	46
BAB V CLOSING.....	49
5.1 Conclusion.....	49
5.2 Advices.....	50
REFERENCES	51
BIOGRAPHY	A-1
ATTACHMENT	B-1

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Klasifikasi kestabilan sistem tenaga	6
Gambar 2.2	Diagram impedansi sistem dua mesin.....	6
Gambar 2.3	Model ideal sistem dua mesin	7
Gambar 2.4	Diagram fasor sistem dua mesin.....	7
Gambar 2.5	Kurva sudut daya karakteristik respon generator pada keadaan gangguan	11
Gambar 2.6	Variasi penggunaan sistem HVDC.	14
Gambar 2.7	Diagram struktur dasar dari HVDC Bipolar	15
Gambar 2.8	Diagram kontrol dasar dari sistem HVDC	16
Gambar 2.9	Perubahan frekuensi sebagai fungsi waktu dengan adanya pelepasan beban.....	18
Gambar 2.10	Definisi Voltage Magnitude Event berdasarkan standar IEEE 1159-1995.....	20
Gambar 3.1	Flowchart studi analisis transien	23
Gambar 3.2	Blok diagram <i>exciter</i> tipe DC4B	30
Gambar 3.3	Blok diagram <i>Governor</i> tipe GP.....	31
Gambar 3.4	Gambaran sederhana interkoneksi menggunakan HVDC di PT. Vale Indonesia	32
Gambar 4.1	Respon frekuensi saat gangguan hubung singkat tiga fasa pada bus R6.....	36
Gambar 4.2	Respon tegangan saat gangguan hubung singkat tiga fasa pada bus R6.....	37
Gambar 4.3	Respon sudut rotor saat gangguan hubung singkat tiga fasa pada bus R6.....	37
Gambar 4.4	Respon frekuensi saat gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus B17.....	38
Gambar 4.5	Respon tegangan saat gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus B17.....	39
Gambar 4.6	Respon sudut rotor saat gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus B17.....	40
Gambar 4.7	Respon tegangan saat simulasi motor starting.....	41
Gambar 4.8	Respon frekuensi saat simulasi motor starting	41
Gambar 4.9	Respon sudut generator saat generator Larona#2 lepas	42
Gambar 4.10	Respon frekuensi saat generator Larona#2 lepas.....	43
Gambar 4.11	Respon tegangan saat generator Larona#2 lepas	43

Gambar 4.12	Respon sudut rotor saat lepas generator Balambano#1 dan Balambano#2.....	44
Gambar 4.13	Respon frekuensi saat lepas generator Balambano#1 dan Balambano#2.....	45
Gambar 4.14	Respon tegangan saat lepas generator Balambano#1 dan Balambano#2.....	45
Gambar 4.15	Respon sudut rotor saat lepas generator Balambano#1 dan Balambano#2 pada sistem dengan interkoneksi menggunakan trafo.....	46
Gambar 4.16	Respon frekuensi saat lepas generator Balambano#1 dan Balambano#2 pada sistem dengan interkoneksi menggunakan trafo.....	47
Gambar 4.17	Respon tegangan saat lepas generator Balambano#1 dan Balambano#2 pada sistem dengan interkoneksi menggunakan trafo.....	47

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Skema pelepasan beban tiga langkah (60Hz)	21
Tabel 2.2	Skema pelepasan beban tiga langkah (50Hz)	21
Tabel 3.1	Kapasitas PLTA di PT. Vale Indonesia	25
Tabel 3.2	Data reaktansi generator PLTA	25
Tabel 3.3	Data momen inertia pembangkit.....	26
Tabel 3.4	Data trafo yang digunakan pada PT. Vale Indonesia	27
Tabel 3.5	Data beban.....	28
Tabel 3.6	Kondisi tegangan tiap bus hasil <i>load flow</i>	29
Tabel 3.7	Parameter <i>exiter</i> tipe DC4B	29
Tabel 3.7	Parameter <i>governor</i> tipe GP	31
Tabel 4.1	Total pembangkitan dan beban di PT. Vale Indonesia.....	33
Tabel 4.2	Studi kasus kestabilan transien.....	34

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT Vale Indonesia merupakan perusahaan penghasil nikel dalam bentuk matte terkemuka di Indonesia. Pada tahun 2015 PT. Vale Indonesia memproduksi 81117 ton nikel dalam matte. Dengan produksi nikel yang besar maka kebutuhan listrik juga besar. Saat ini kebutuhan listrik utama PT. Vale disuplai dari 3 unit PLTA yaitu PLTA Larona (3 x 65 MW), PLTA Balambano (2 x 68.5 MW) dan PLTA Karebbe (2x78 MW). Sebagai cadangan menggunakan PLTD (5 x 8 MW) serta steam turbin (26 MW). Agar proses produksi nikel tetap berjalan maksimal maka perusahaan harus tetap menjaga kontinuitas aliran daya listrik yang stabil.

Gangguan merupakan salah satu faktor penyebab ketidakstabilan pada sistem tenaga listrik. Gangguan pada sisi suplai yang menyebabkan generator trip, sehingga sistem tidak seimbang karena jumlah daya suplai lebih sedikit daripada daya beban. Sedangkan gangguan hubung singkat yang menyebabkan pelepasan beban secara tiba-tiba sehingga suplai daya lebih besar dari daya beban. *Starting* motor yang berdaya besar juga dapat mempengaruhi sistem akibat dari arus *starting* yang besar.

Beberapa jenis gangguan yang telah disebutkan dapat mengakibatkan sistem keluar dari batas stabil. Agar sistem tenaga listrik tidak mengalami pemadaman total akibat dari gangguan maka sebagian beban yang bekerja harus dilepaskan agar terjadi keseimbangan antara daya yang dibangkitkan dengan daya beban.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang akan dibalas dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana mekanisme pelepasan beban yang digunakan PT. Vale saat ini ?
2. Mengapa PT Vale tidak lagi menggunakan mekanisme pelepasan secara otomatis?
3. Bagaimana respon frekuensi, tegangan dan sudut pada generator saat dilakukan analisis kestabilan transien ?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penyelesaian tugas akhir ini yakni sebagai berikut :

1. Sumber tenaga listrik yang disimulasikan hanya dari sumber utama saat ini yaitu 3 unit PLTA.
2. Software yang digunakan adalah ETAP 12.6
3. Analisis difokuskan pada stabilitas transien
4. Jenis gangguan yang menyebabkan generator trip tidak disertakan.

1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini ialah sebagai berikut:

1. Melakukan studi tentang kestabilan transien sistem kelistrikan PT Vale untuk mendapatkan rekomendasi yang diperlukan sehingga dicapai keandalan serta stabilitas yang layak dan mampu megatasi setiap gangguan-gangguan yang terjadi.
2. Menganalisa apakah diperlukan suatu skema *load shedding* dan bagaimana rancangannya agar sistem kembali dapat stabil ketika terjadi gangguan.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Mengumpulkan buku dan referensi mengenai analisis stabilitas transien dan pelepasan beban
2. Pengumpulan Data
Pengumpulan data berupa single line diagram dan peralatan listrik dari PT Vale Indonesia yang meliputi : data generator, data transformator, data jaringan menengah serta skema operasi yang ada.
3. Pemodelan Sistem
Data yang telah didapatkan dimodelkan dalam single line diagram dengan menggunakan software ETAP 12.6
4. Simulasi dan Analisa Aliran Daya
Setelah pemodelan sistem kelistrikan pada etap selesai selanjutnya ialah melakukan simulasi aliran daya (*Load Flow*)

untuk mengetahui aliran daya pada sistem dan menganalisa skema operasi yang digunakan. Hasil dari analisa daya digunakan sebagai acuan untuk menentukan studi kasus transien yang akan dilakukan. Selain itu hasil tersebut digunakan sebagai acuan dalam pelepasan beban.

5. Simulasi dan Analisa Transien

Setelah menentukan studi kasus yang digunakan analisis transien maka dilakukan simulasi. Gangguan transien yang disimulasikan ada tiga yakni generator outage, motor starting, dan gangguan hubung singkat.

Untuk simulasi lepas generator dan gangguan hubung singkat yang diamati ialah respon pada bus di bawah generator dan bus terjauh dari sistem tegangan menengah.

Pada simulasi motor starting yang diamati adalah respon pada bus dibawah generator dan bus yang terhubung pada motor.

Dari hasil simulasi transien akan dianalisa respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor akibat gangguan transien.

6. Penarikan Kesimpulan

1.6 Sistematika Penulisan

Pada penyusunan Tugas Akhir ini pembahasan akan dibagi menjadi lima Bab dengan sistematika sebagai berikut :

Bab I : Pendahuluan

Bab ini membahas tentang latar belakang, permasalahan batasan masalah, tujuan, metodologi dan sistematika penulisan laporan

Bab II : Dasar Teori

Bab ini membahas secara umum teori tentang stabilitas transient, HVDC , standar frekuensi dan tegangan serta konsep pelepasan beban.

Bab III : Sistem Kelistrikan PT Vale Indonesia

Bab ini berisi tentang sistem kelistrikan PT Vale Indonesia beserta spesifikasi peralatan listrik yang ada pada PT Vale Indonesia

Bab IV : Simulasi dan Analisis

Bab ini membahas data hasil simulasi stabilitas transien pada generator serta bus akibat generator *outage*, motor *starting* dan hubung singkat. Dari hasil simulasi stabilitas

transien dianalisa respon sudut generator, frekuensi dan tegangan sebelum, saat dan setelah terjadi gangguan.

Bab V : Penutup

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah didapatkan.

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Stabilitas sistem tenaga secara luas didefinisikan sebagai kemampuan suatu sistem tenaga untuk tetap dalam kondisi operasi seimbang saat terjadi kondisi tidak normal dan dapat kembali ke kondisi seimbang setelah terjadi gangguan [1].

Ketika sistem beroperasi dalam keadaan mantap jika tiba-tiba mengalami perubahan pada satu atau lebih parameter dari sistem, data dikatakan bahwa sistem telah mengalami gangguan dari kondisi mantap. Gangguan pada sistem tenaga listrik yang dapat mempengaruhi stabilitas ada dua jenis yaitu gangguan besar dan gangguan kecil. [2]

Kegagalan sistem transmisi, perubahan beban secara tiba-tiba, lepasnya unit pembangkit, dan pengalihan saluran adalah contoh dari gangguan besar. Jika sistem tenaga beroperasi dalam keadaan mantap dan mengalami perubahan yang dapat dianalisis secara benar dengan versi dinamik linear dan persamaan aljabar, dapat dikatakan bahwa sistem mengalami gangguan kecil. [2]

Ketidakstabilan dalam sistem tenaga dapat terjadi akibat banyak hal bergantung pada konfigurasi sistem dan pola operasi yang digunakan. Secara mendasar masalah kestabilan salah satunya adalah menjaga operasi sinkron antar generator yang terinterkoneksi. Kestabilan generator ini dipengaruhi oleh perubahan dari sudut daya generator.

Berdasarkan paper IEEE *definition and classification of power system stability*, kestabilan sistem tenaga listrik dibagi menjadi 3 kategori yaitu [3]:

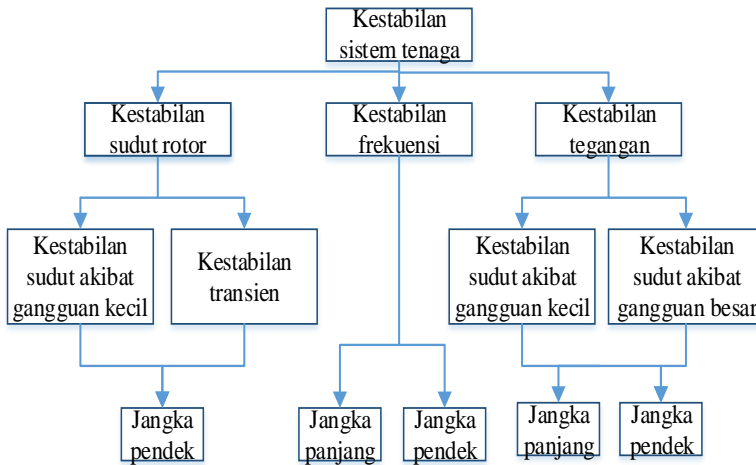
1. Kestabilan Sudut Rotor
2. Kestabilan Tegangan
3. Kestabilan Frekuensi

Gambar 2.1 berikut ini diagram klasifikasi kestabilan sistem tenaga .

2.1.1 Kestabilan Sudut Rotor

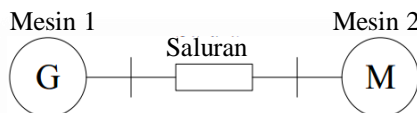
Kestabilan sudut rotor mengacu kepada kemampuan beberapa mesin sinkron yang saling interkoneksi pada sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkron setelah mengalami gangguan . Hal ini tergantung pada kemampuan untuk mempertahankan / mengembalikan

keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik dari setiap mesin sinkron yang terhubung pada sistem.



Gambar 2.1 Klasifikasi kestabilan sistem tenaga [3]

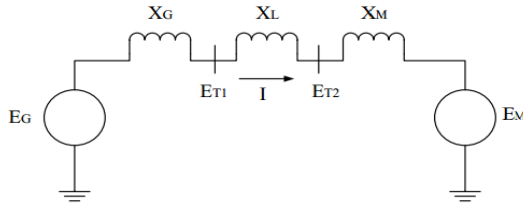
Salah satu karakteristik yang penting dalam kestabilan sistem tenaga listrik adalah hubungan antara perubahan daya dan posisi rotor pada mesin sinkron. Hubungan sudut rotor dan daya ini sangat tidak linear. Ilustrasi dari hubungan ini dapat dilihat pada gambar 2.2 dan 2.3



Gambar 2.2. Diagram impedansi sistem dua mesin [1]

Pada gambar 2.2 diatas dua mesin sinkron terhubung melalui sebuah saluran transmisi yang memiliki nilai reaktansi namun nilai resistansi dan kapasitansi diabaikan. Diasumsikan bahwa mesin 1 merupakan generator yang mensuplai daya menuju ke motor yaitu mesin 2. Daya yang disalurkan dari generator ke motor merupakan fungsi perbedaan sudut (δ) antara dua mesin tersebut. Perbedaan sudut ini diakibatkan oleh tiga komponen, yaitu :

1. Sudut internal generator δ_G , sudut dimana rotor dari generator mendahului medan putar pada stator.
2. Perbedaan sudut antara tegangan terminal generator dan motor, sudut δ_L dimana tegangan terminal generator mendahului tegangan motor.
3. Sudut internal motor δ_M , sudut dimana rotor tertinggal oleh medan putar stator pada motor.

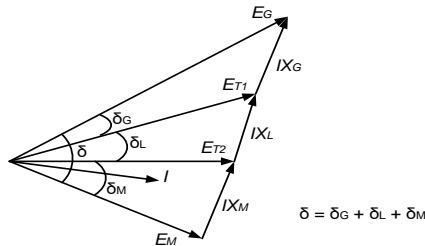


Gambar 2.3 Model ideal sistem dua mesin [1]

Gambar 2.3 menunjukkan sebuah model dari sistem yang dapat digunakan untuk menghitung hubungan antara daya terhadap sudut, dimana :

- E_G = Tegangan internal generator (p.u)
- E_M = Tegangan internal motor (p.u)
- X_G = Reaktansi internal generator (p.u)
- X_M = Reaktansi internal motor (p.u)
- X_L = Reaktansi saluran (p.u)

Diagram fasor hubungan antara tegangan internal motor E_m dengan tegangan internal generator E_G berdasarkan ketiga komponen diatas dpat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Diagram fasor sistem dua mesin [1]

Dari gambar fasor diatas dapat diperoleh suatu persamaan yang menyatakan hubungan daya generator yang ditransfer ke motor dalam fungsi sudut :

$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta \quad (2.1)$$

$$X_T = X_G + X_L + X_M \quad (2.2)$$

Pada saat sistem dalam kondisi *steady state* terdapat kesetimbangan antara torsi elektrik dan torsi mekanik dari masing-masing generator dan kecepatan tetap konstan. Jika sistem mengalami gangguan, titik kesetimbangan ini akan berubah dan mengakibatkan percepatan atau perlambatan sudut rotor. Ketika salah satu generator berputar lebih cepat dari generator yang lain, posisi sudut rotor relative terhadap generator yang lebih lambat akan meningkat. Perbedaan sudut yang dihasilkan antara mesin yang lebih lambat dengan mesin yang lebih cepat bergantung pada hubungan daya dan sudut rotor.

Kestabilan sudut rotor secara umum dibedakan menjadi dua bagian, yaitu:

1. Kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil [3]

Gangguan kecil ini tergantung pada keadaan awal operasi sistem. Ketidakstabilan mungkin timbul karena 2 hal yaitu i) peningkatan sudut rotor pada mode non osilasi dan tidak periodic karena kurangnya torsi sinkronisasi. ii) Osilasi sudut rotor meningkat karena kurangnya torsi redaman yang cukup.

2. Kestabilan sudut rotor akibat gangguan besar [3]

Gangguan ini biasa disebut sebagai *transient stability*. Yaitu kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi ketika mengalami gangguan yang parah. Seperti gangguan hubung singkat pada saluran transmisi. Respon sistem yang dihasilkan besarnya sudut rotor generator dan dipengaruhi oleh adanya hubungan sudut daya.

Kestabilan transien bergantung pada kondisi awal sistem operasi dan tingkat keparahan dari gangguan yang terjadi. Ketidakstabilan biasanya menghasilkan sudut baru karena torsi sinkronisasi tidak cukup. Sehingga mewujudkan ketidakstabilan ayunan pertama. Tapi dalam sistem tenaga listrik yang besar mungkin tidak selalu terjadi ketidakstabilan ayunan pertama, melainkan bisa menjadi hasil dari superposisi dari mode ayunan interarea yang lambat, sehingga menyebabkan ketidakstabilan melebihi ayunan pertama

2.1.2 Kestabilan Frekuensi [3]

Kestabilan frekuensi mengacu kepada kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi *steady state* frekuensi akibat gangguan yang menyebabkan ketidakseimbangan antara pembangkitan dan pembebanan. Hal ini bergantung dari kemampuan untuk mempertahankan atau mengembalikan keseimbangan antara pembangkitan dan pembebanan akibat adanya hilangnya beban. Umumnya, masalah kestabilan frekuensi dikaitkan ketidakmampuan dari respon peralatan, lemahnya kordinasi dari peralatan kontrol dan peralatan frekuensi atau kurangnya daya cadangan pembangkitan (*spining reserve*).

Selama penyimpangan frekuensi, besarnya tegangan bisa berubah dengan signifikan, terutama untuk kondisi *islanding* dengan *underfrekuensi load shedding*. Besarnya perubahan tegangan yang mungkin lebih tinggi dari perubahan frekuensi mempengaruhi ketidakseimbangan beban pembangkitan.

2.1.3 Kestabilan Tegangan [3]

Stabilitas tegangan mengacu pada kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan tegangan yang stabil pada semua bus dalam sistem setelah mengalami gangguan dari kondisi awal. Hal ini tergantung pada kemampuan sistem untuk mempertahankan / mengembalikan keseimbangan antara permintaan beban dan suplai ke beban pada sistem tenaga. Ketidakstabilan dapat mengakibatkan penurunan atau kenaikan tegangan pada beberapa bus.

Penurunan bertahap tegangan dibus dapat dikaitkan dengan kestabilan sudut rotor. Sebagai contoh hilangnya sinkronisasi dari mesin sebagai sudut rotor antara dua kelompok mesin dengan pendekatan 180° menyebabkan penurunan tegangan yang cepat pada daerah disekitar gangguan.

Akibat yang mungkin terjadi karena ketidakstabilan tegangan adalah kehilangan beban pada suatu area atau lepasnya jaringan transmisi karena bekerjanya relay proteksi. Faktor utama yang berkontribusi ketidak stabilan tegangan adalah ketika gangguan yang terjadi menyebabkan kebutuhan daya reaktif meningkat diluar dari kapasitas sumber daya reaktif yang tersedia.

2.2 Kestabilan Transien

Kestabilan transien adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang

bersifat mendadak selama sekitar satu “swing” (yang pertama) dengan asumsi bahwa pengatur tegangan otomatis (AVR) dan governor belum bekerja. [4].

Pada analisis kestabilan transien menggunakan pendekatan model nonlinear. Kestabilan transien merupakan fungsi dari kondisi operasi dan gangguan. Situasi yang lebih hebat akan terjadi bila pembangkitan atau beban besar hilang dari sistem atau terjadi gangguan pada saluran transmisi. Pada kasus semacam itu stabilitas *transient* harus cukup kuat untuk mempertahankan diri terhadap kejutan (*shock*) atau perubahan beban yang relatif besar yang terjadi.

Setelah hilangnya pembangkitan atau beban besar secara tiba-tiba, keseimbangan antara energi input dan output listrik pada sistem akan hilang. Jika energi input tidak lagi mencukupi, inersia rotor mesin yang masih bekerja, pada periode yang singkat akan melambat. Apabila beban hilang maka energi input pada sistem akan melebihi beban listrik, dan mesin akan bergerak semakin cepat.

Study kestabilan transien bertujuan untuk menentukan apakah sistem tadi akan tetap dalam keadaan serempak setelah terjadinya gangguan besar, misalnya adanya motor starting yang besar, perubahan beban yang mendadak, terputusnya unit pembangkit, atau pemutaran saklar (*switching*) saluran.

Masalah kestabilan transien menyangkut gangguan besar yang tidak lagi memungkinkan proses kelinieran, sehingga persamaan tidak linier differensial dan aljabar harus diselesaikan dengan metoda langsung atau dengan prosedur iterasi. Perkiraan yang biasa digunakan untuk transfer daya diberikan oleh:

$$P = \frac{V_t V_\infty}{x} \sin \delta \quad (2.3)$$

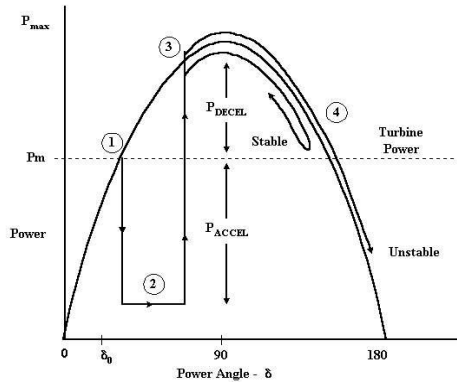
Dengan :

V_t : tegangan terminal mesin (volt)

V_∞ : tegangan *infinite* bus (volt)

P : Daya (watt)

δ : Sudut rotor (derajat)



Gambar 2.5 Kurva sudut daya karakteristik respon generator pada keadaan gangguan [5]

Analisa stabilitas transien pada Gambar 2.5 memberikan ilustrasi karakteristik respon generator pada keadaan gangguan. Titik kerja awal (titik 1), sebelum terjadi gangguan. Dengan terjadinya gangguan menyebabkan daya output generator turun secara drastis. Selisih antara daya output listrik dengan daya input mekanis turbin mengakibatkan rotor generator mengalami percepatan, sehingga sudut rotor atau daya bertambah besar (titik 2). Pada saat gangguan hilang, daya output generator pulih pada harga yang sesuai dengan kurva sudut daya ($P - \delta$) diatas (titik 3). Setelah gangguan hilang, daya output generator menjadi lebih besar daripada daya mekanis turbin. Hal ini mengakibatkan perlambatan pada rotor generator (titik 4).

Bila terdapat torsi lawan yang cukup setelah gangguan hilang untuk mengimbangi percepatan yang terjadi selama terjadinya gangguan, generator akan stabil setelah ayunan pertama dan akan kembali ke titik kerjanya dalam waktu kira-kira 0,5 detik. Bila torsi lawan tersebut tidak cukup besar maka sudut rotor atau daya akan terus bertambah besar sampai sinkronisasi dengan sistem menjadi hilang [5].

2.3 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan [2]

Persamaan yang mengatur gerakan rotor suatu mesin serempak didasarkan pada prinsip dasar dinamika yang menyatakan bahwa momen putar percepatan (*accelerating torque*) adalah hasil kali dari momen-momen kelembaman (*moment of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya.

Dalam sistem unit-unit MKS dan untuk generator serempak, persamaan ini dapat ditulis dalam bentuk sebagai berikut :

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.4)$$

Dengan keterangan sebagai berikut :

- J = Momen kelembaman total dari massa rotor dalam $kg-m^2$
- θ_m = Pergeseran sudut dari rotor terhadap suatu sumbu yang diam (*stationary*), dalam radian mekanis
- t = Waktu, dalam detik
- T_a = Momen putar percepatan bersih, dalam Nm
- T_m = Momen putar mekanis atau poros (penggerak) yang diberikan oleh penggerak mula dikurangi dengan momen putar perlambatan (*retarding*) yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran, dalam Nm
- T_e = Momen putar elektris atau elektromagnetis bersih, dalam Nm

Pada persamaan 2.4 karena θ_m diukur terhadap sumbu yang diam, maka untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu yang berputar terhadap kecepatan sinkron adalah seperti persamaan berikut :

$$\theta_m = \omega_m t - \delta_m \quad (2.6)$$

Dengan θ_m adalah pergeseran sudut rotor dalam satuan radian terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron. Penurunan persamaan diatas terhadap waktu memberikan kecepatan putaran rotor sebagai berikut :

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.7)$$

Dari persamaan 2.6 Dan 2.7 maka didapatkan

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.8)$$

Jika persamaan 2.8 diatas dikalikan dengan ω_m maka :

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.9)$$

Dengan $J \omega_m$ adalah momen sudut (*angular momentum*) rotor yang dinyatakan dengan M. Hubungan energi kinetik dengan massa berputar adalah sebagai berikut

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m \quad (2.10)$$

Atau

$$M = \frac{2W_k}{\omega_m} \quad (2.11)$$

Bila ω_m tidak berubah sebelum stabilitas hilang maka M dievaluasi dengan kecepatan serempak sebagai berikut:

$$M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \quad (2.12)$$

Persamaan ayunan dalam hubungannya dengan moment sudut adalah sebagai berikut :

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.13)$$

Konstanta H yang dijumpai pada mesin listrik didefinisikan sebagai energi kinetik (MJ) pada kecepatan sinkron dibagi dengan rating daya mesin (MVA) dituliskan sebagai berikut.

$$H = \frac{\frac{1}{2} M \omega_{sm}^2}{S_{mach}} \quad (2.14)$$

$$M = \frac{2H}{\omega_{sm}} S_{mach} \quad (2.15)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2.15) ke dalam persamaan (2.13) maka didapatkan persamaan :

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \times S_{mach} \times \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.16)$$

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \times \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \frac{P_m - P_e}{S_{mach}} \quad (2.17)$$

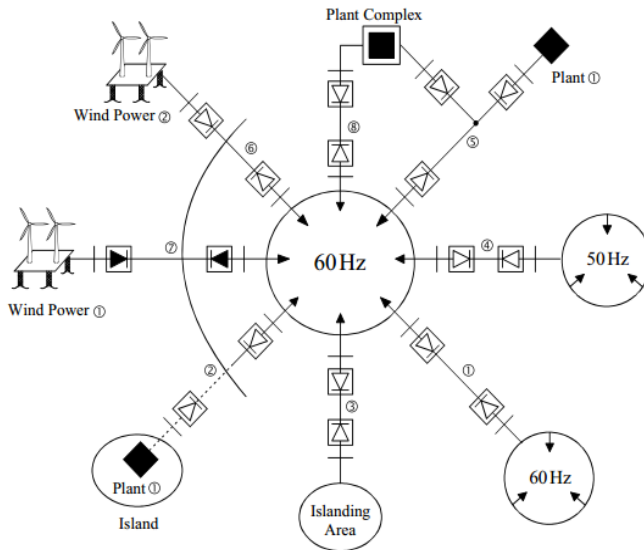
$$\frac{H}{\pi f} \times \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \text{ per unit} \quad (2.18)$$

2.4 HVDC Transmission [6]

Semakin berkembangnya teknologi semikonduktor membuat penggunaan tegangan tinggi arus searah (HVDC) semakin meningkat. HVDC juga memiliki beberapa kelebihan yang bisa mengatasi persoalan tegangan tinggi AC. Gambar 2.6 menunjukkan jenis-jenis penggunaan HVDC.

Gambaran struktur dan komponen dasar dari HVDC dapat dilihat pada gambar 2.7. Gambar nomor satu menunjukkan pemutus AC (AC Breaker). Pemutus AC digunakan mengisolasi sistem HVDC dari sistem AC ketika terjadi kegagalan sistem HVDC.

Bagian nomor dua adalah filter AC dan bank kapasitor. Konverter menimbulkan harmonisa tegangan dan arus pada sisi AC maupun DC oleh karena itu filter AC dibutuhkan untuk menghilangkan harmonisa tersebut.



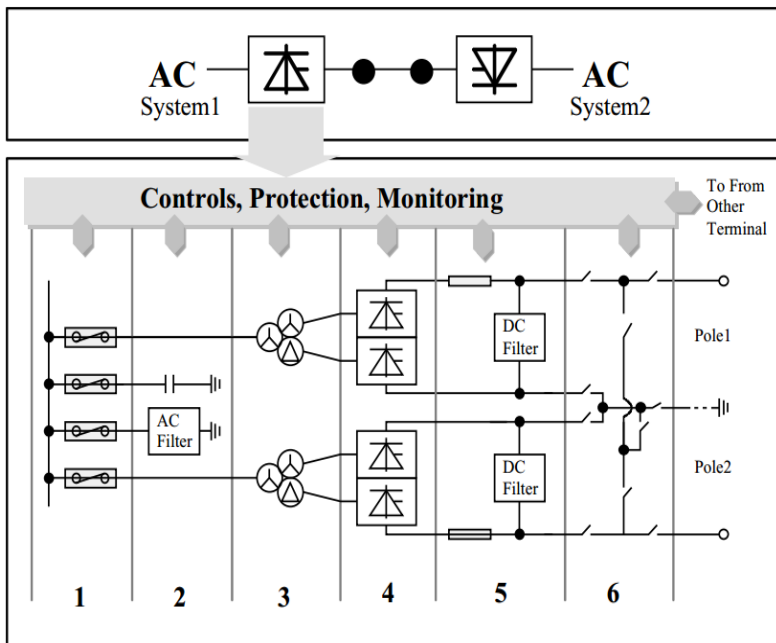
Gambar 2.6 Variasi penggunaan sistem HVDC [6]

Transformator konverter terdapat pada bagian nomor tiga. Transformator konverter adalah jenis trafo 3 belitan untuk menghasilkan 6 pulsa tegangan.

Konverter thyristor adalah komponen utama dari transmisi daya HVDC, yang dikembangkan oleh elektronika daya. Alat ini digunakan untuk mengkonversi dari AC menjadi DC atau dari DC menjadi AC.

Pada bagian nomor 5 terdapat *Smoothing Reactor* dan filter DC. *Smoothing Reactor* berfungsi untuk mengurangi riak pada tegangan DC. *Reactor* membentuk component integral bersama dengan filter DC untuk melindungi katup konverter pada saat terjadi kegagalan komutasi dengan membatasi kenaikan arus yang mengalir ke konverter.

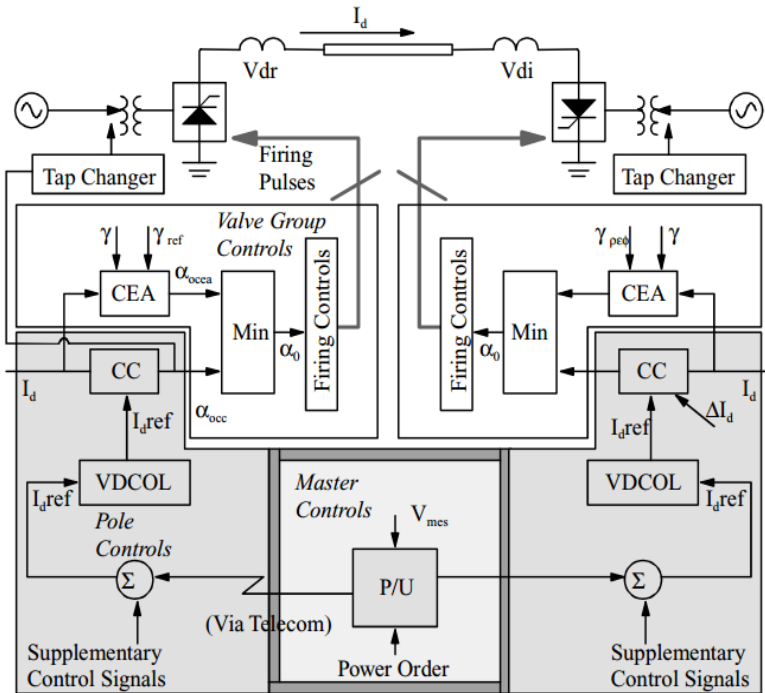
Diagram dasar dari Struktur Kontrol HVDC dapat dilihat pada gambar 2. *Master control* menentukan suplai daya, frekuensi dan menghitung suplai arus untuk kedua kutub. Kemudian suplai arus yang diterima dari *master control* dimodifikasi oleh fungsi control dan batasan pada kontrol kutub. *Valve group control* terdiri dari control converter dan sebuah *valve firing control*. Kontrol converter termasuk pengontrol arus. *Valve firing control* mendistribusikan sinyal penyulutan ke semua thyristor.



Gambar 2.7 Diagram struktur dasar dari HVDC Bipolar [6]

Terdapat dua tipe konfigurasi dari converter 3 phasa pada HVDC yaitu :

1. Current Source Converter (CSC)
2. Voltage Source Converter (VSC)



Gambar 2.8 Diagram kontrol dasar dari sistem HVDC [6]

Transmisi HVDC mempunyai beberapa tipe yakni sebagai berikut:

1. Monopolar HVDC. Tipe ini mempunyai satu konduktor dengan balik penghantar balik lewat tanah ataupun laut. Metode ini umumnya digunakan untuk transmisi daya yang menggunakan kabel. Penghantar balik dengan menggunakan konduktor lebih baik daripada lewat tanah apabila resistansi tanah terlalu besar.
2. Bipolar HVDC. Tipe ini mempunyai dua kutub yaitu kutub positif dan kutub negatif dengan titik netral tanah. Pada keadaan operasi mantap, arus yang mengalir pada kedua kutub sama dan tidak ada arus yang mengalir pada tanah. Kedua kutub dapat dioperasikan terpisah. Jika satu kutub tidak berfungsi, kutub yang lain masih dapat mentransfer daya dengan penghantar balik tanah.

2.5 *Back-to Back* HVDC

Back-to-Back HVDC adalah jenis HVDC dimana rectifier dan inverter berada pada satu lokasi yang sama. Pada umumnya digunakan untuk menghubungkan dua sistem AC yang tidak sinkron (*asynchronous system*).

Penggunaan BTB (*Back-to-Back*) HVDC yang menghubungkan dua sistem AC yang berbeda frekuensi dapat dilihat pada Konverter frekuensi di Sakuna, Jepang.

Selama transmisi daya DC menyalurkan daya aktif dan tanpa daya reaktif untuk sistem AC lainnya, arus kontribusi dari salah satu sistem sistem tidak meningkat saat sistem AC mengalami gangguan. Sehingga terlihat seperti dua sistem yang terpisah. Jadi mempartisi sistem AC dan menginterkoneksi dengan menggunakan sistem DC, dapat menekan arus hubung singkat secara efektif dan keseluruhan sistem dapat dioperasikan dengan lancar.

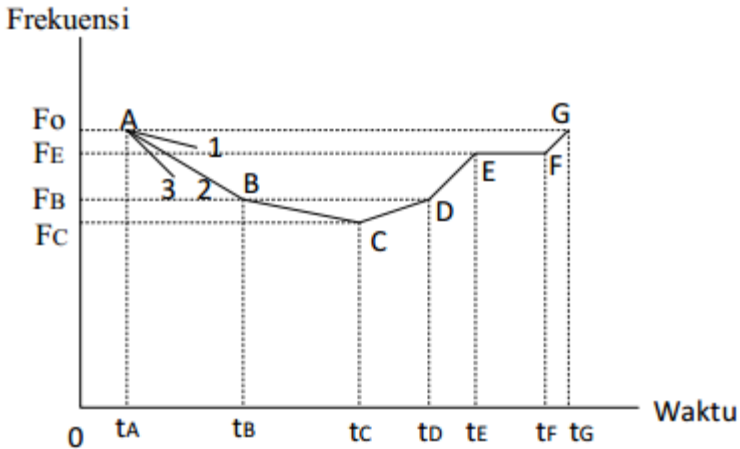
2.6 Sistem Pengoperasian *Load Shedding* [7]

Jika terjadi gangguan pada sistem yang menyebabkan besarnya suplai daya yang dihasilkan oleh pembangkit tidak mencukupi kebutuhan beban seperti kasus lepasnya generator (trip), maka untuk mencegah terjadinya ketidakstabilan sistem perlu dilakukan pelepasan beban (*load shedding*). Keadaan kritis pada sistem dapat dideteksi melalui frekuensi sistem yang menurun dengan cepat. Hal ini diilustrasikan pada gambar 2.9.

Pada saat $t=t_A$, terdapat unit pembangkit yang lepas sehingga frekuensi menurun tajam. Penurunan frekuensi sistem ini bisa melalui garis 1, garis 2 atau garis 3 bergantung pada besarnya kapasitas pembangkit yang lepas dibandingkan kebutuhan beban yang ada. Semakin besar daya yang hilang maka akan semakin cepat frekuensi menurun. Kecepatan menurunnya frekuensi sistem juga bergantung pada inersia sistem. Semakin besar nilai inersia, makin kokoh sistemnya dan makin lambat turunnya frekuensi.

Pada gambar 2.9 dimisalkan frekuensi sistem menurun mengikuti garis 2. Setelah mencapai titik B dilakukan pelepasan beban tahap pertama oleh *Under Frequency Relay* (UFR) yang bekerja setelah mendeteksi turunnya frekuensi sistem mencapai F_r . Setelah dilakukan pelepasan beban tahap pertama, kecepatan turunnya frekuensi berkurang. Namun karena kurangnya suplai daya frekuensi sistem masih menurun

hingga titik C, sehingga dilakukan pelepasan beban tahap kedua setelah UFR mendeteksi turunnya frekuensi hingga f_C .



Gambar 2.9 Perubahan frekuensi sebagai fungsi waktu dengan adanya pelepasan beban [7]

Setelah dilakukan pelepasan beban tahap kedua, sistem mulai kembali stabil ditunjukkan dengan tidak menurunnya frekuensi sistem. Frekuensi sistem naik hingga titik D dikarenakan setelah dilakukan pelepasan beban tahap kedua besarnya suplai daya lebih besar daripada total beban. Dimulai dari titik D, governor pembangkit mulai bekerja melakukan pengaturan primer yaitu selama t_D .

Waktu sebelum bekerjanya governor ini (t_D) berkisar selama 4 detik. Periode sebelum governor melakukan pengaturan primer disebut periode transien dan berlangsung selama kira-kira 4 detik. Setelah governor melakukan pengaturan primer maka frekuensi sistem naik hingga mencapai f_E . Kemampuan governor melakukan pengaturan primer bergantung pada besarnya *spinning reserve* yang masih tersedia dalam sistem. Setelah mencapai titik E masih ada penyimpangan frekuensi sebesar F dari frekuensi sistem yang diinginkan yaitu f_0 dan penyimpangan ini dikoreksi dengan pengaturan sekunder oleh governor yang dimulai pada titik F dan akhirnya frekuensi sistem kembali stabil pada titik G.

Apabila unit pembangkit yang lepas tidak begitu besar mungkin penurunan frekuensi tidak mencapai titik C sehingga dengan pelepasan beban tahap pertama saja sudah cukup untuk mengembalikan sistem menjadi stabil. Dalam prakteknya, pelepasan beban dilakukan dengan memasang UFR (*Under Frequency Relay*) pada berbagai *feeder* distribusi yang dipilih menurut kondisi setempat. Jumlah UFR harus sedikitnya cukup untuk melepas beban sebesar unit terbesar dalam sistem.

Penurunan frekuensi bisa terjadi pada saat lepasnya pembangkit. Selama kurun waktu 2 detik yaitu periode ketiga governor belum bekerja, frekuensi menurun dengan cepat dan mencapai tingkatan minimum. Kemudian governor bekerja sehingga frekuensi kembali pas kondisi stabil yang lebih rendah dari frekuensi normalnya. Frekuensi ini disebut frekuensi residu. Skema pelepasan yang tepat harus menentukan frekuensi minimum dan frekuensi residu. Skema pelepasan yang tepat harus menentukan frekuensi minimum dan frekuensi residu.

Pelepasan beban dapat dilakukan dengan dua acara yaitu :

1. Pelepasan beban secara manual (*Manual Load Shedding*)
2. Pelepasan beban secara otomatis (*Automatic Load Shedding*)

2.6.1 Pelepasan Beban Secara Manual

Pelepasan beban secara manual hanya dapat dipakai dalam keadaan yang tidak begitu penting, seperti perkembangan beban yang melebihi kapasitas pembangkit atau turunnya tegangan di dalam daerah tertentu yang disebabkan oleh gangguan. Dalam keadaan darurat karena turunnya tegangan hingga 80%, operator akan mengambil inisiatif sendiri untuk melakukan pelepasan beban.

Kekurangan dari pelepasan beban secara manual adalah membutuhkan operator yang selalu siap dan handal karena keterlambatan operator dalam mengatasi permasalahan ini akan berakibat fatal pada stabilitas sistem.

2.6.2 Pelepasan Beban Secara Otomatis

Dalam perencanaan pelepasan beban secara otomatis memerlukan pemasangan alat yang tepat dan dapat melindungi sistem dengan cepat apabila terjadi penurunan frekuensi yang besar dalam waktu yang sangat singkat. Alat tersebut adalah UFR (*Under Frequency Relay*). Rele ini digunakan untuk mendeteksi frekuensi pada satu batas tertentu.

2.7 Standar yang Digunakan untuk Analisis Kestabilan Transien

2.7.1 Standar Frekuensi untuk *Hydraulic turbine* (IEEE Std C37.106-2003) [8]

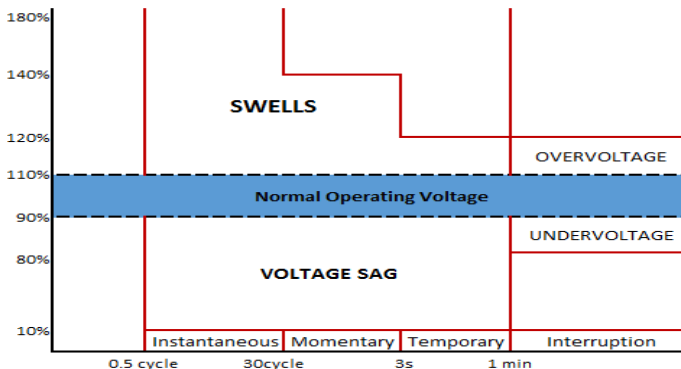
Batasan frekuensi yang tidak normal untuk generator turbin hidrolik jauh lebih kecil daripada STG dan CTG. Umumnya generator turbin hidrolik dirancang untuk dapat menahan overspeed yang lebih parah daripada turbin uap, dalam beberapa kasus bisa melebihi 100% . Desain *bucket* pada unit hidro lebih kasar daripada desain pisau sudu-sudu pada turbin lain.. Kemampuan frekuensi abnormal untuk pengoperasian terus menerus unit hidro umumnya berada di luar kisaran dari 57-63 Hz (47.5-52.5 untuk sistem 50 Hz) atau 95-105 dalam persen.

2.7.2 Standar Tegangan

Standar yang digunakan untuk tegangan nominal dalam kondisi normal adalah berdasarkan standar PLN, yaitu:

- 500 kV +5%, -5%
- 150 kV +5%, -10%
- 70 kV +5%, -10%
- 20 kV +5%, -10%

Sedangkan standar yang digunakan untuk kedip tegangan adalah IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality (IEEE Std 1159-1995) [9].



Gambar 2.10 Definisi *Voltage Magnitude Event* berdasarkan standar IEEE 1159-1995 [9]

2.7.3 Standar Pelepasan Beban [10]

Skema pelepasan beban menurut standar ANSI/IEEE C37.106-1987 ada dua jenis, yakni pelepasan beban menggunakan tiga langkah dan pelepasan beban enam langkah. Skema pelepasan beban tiga langkah sesuai standar ANSI/IEEE C37.106-1987 dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Skema Pelepasan Beban Tiga Langkah (60Hz)

Langkah	Titik Pemberhentian Frekuensi (Hz)	Jumlah Pelepasan Beban (%)	Waktu <i>delay</i> pada relay (<i>Cycles</i>)
1	59,3	10	6
2	58,9	15	6
3	58,5	Disarankan untuk menangkap penurunan sebelum 58,2 Hz	

Tabel 2.1 Skema Pelepasan Beban Tiga Langkah (50Hz)

Langkah	Titik Pemberhentian Frekuensi (Hz)	Jumlah Pelepasan Beban (%)	Waktu <i>delay</i> pada relay (<i>Cycles</i>)
1	49,41	10	6
2	49,08	15	6
3	48,75	Disarankan untuk menangkap penurunan sebelum 48,5 Hz	

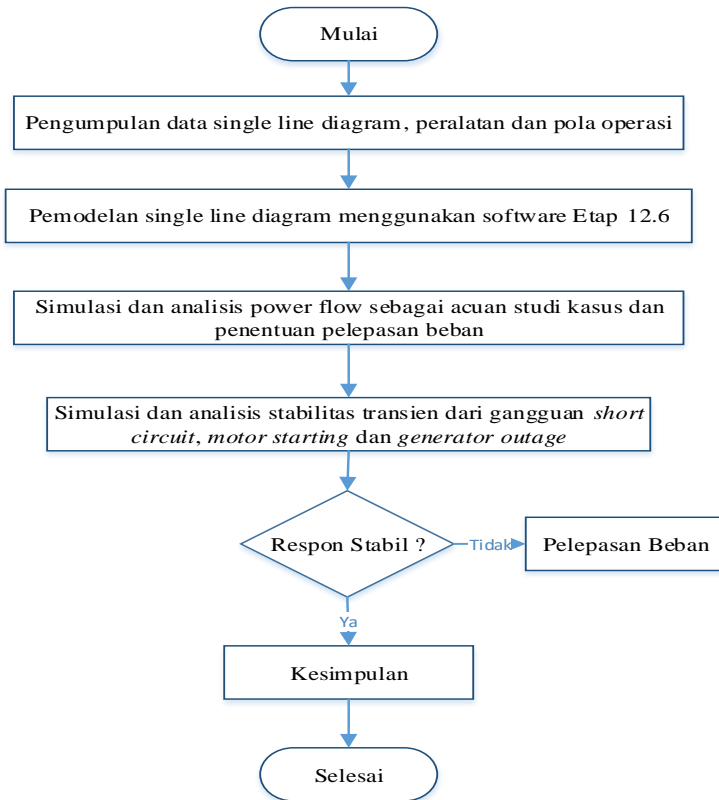
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

SISTEM KELISTRIKAN PT. VALE INDONESIA

3.1 Metode Pelaksanaan Studi

Metode yang digunakan untuk studi analisis kestabilan transien pada sistem kelistrikan PT. Vale Indonesia digambarkan dalam *flowchart* pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Flowchart studi analisis transien

3.2 Sistem kelistrikan di PT Vale Indonesia

PT Vale Indonesia berada dekat dengan Danau Towuti, dan sangat strategis untuk menggunakan PLTA sebagai sumber listrik. PT Vale dengan produksi nikel dalam bentuk matte yang besar membutuhkan tenaga listrik yang besar pula. Saat ini PT Vale mempunyai 3 unit PLTA yaitu PLTA Larona dengan kapasitas 3 x 68 MW, PLTA Balambano dengan kapasitas 2 x 68.5 MW dan PLTA Karebbe dengan kapasitas 2 x 65 MW. Selain PLTA PT Vale Indonesia juga memiliki PLTD dengan kapasitas 5 x 8 MW dan 23 x 1 MW serta Steam Power Plant dengan kapasitas 1x 28 MW. Saat ini suplai kelistrikan utama PT Vale menggunakan PLTA, sedangkan PLTD dan steam power plant digunakan sebagai cadangan.

Karena jarak PLTA dengan plant site cukup jauh, maka PT Vale menggunakan jaringan transmisi 150 kV untuk menyalurkan daya dari pembangkit menuju ke plant site. Terdapat 2 jalur transmisi *double circuit*. Satu transmisi digunakan untuk menyalurkan daya dari PLTA Larona dan yang lainnya digunakan untuk menyalurkan daya dari PLTA Balambano dan Karebbe.

Pada plant site sistem kelistrikan dari transmisi 150 kv dibagi dua grid, yakni grid Furnace dari 150kv menjadi 33 kV dan grid Auxiliary dari 150 kV ke 11 kV. Pada Grid Auxiliary terdapat dua level tegangan tinggi menengah yaitu 11kV dan 3,3kV. Kedua Grid ini diinterkoneksi dengan menggunakan *DC Link*. Grid Furnace hanya khusus untuk mensuplai daya untuk tanur peleburan nikel, Sedangkan Grid Auxiliary untuk segala kebutuhan perusahaan selain peleburan dan untuk suplai perumahan bahkan untuk masyarakat sekitar yang dikelola PLN.

3.3 Data Kelistrikan di PT Vale Indonesia

3.3.1 Sistem Pembangkitan

Sistem Pembangkitan pada PT Vale ketika semua PLTA beroperasi normal salah satu generator pada unit PLTA Larona digunakan untuk mensuplai daya untuk grid *auxiliary* dengan menggunakan satu line dari transmisi Larona-Plant site. Sedangkan generator lain pada unit PLTA Larona digunakan untuk menyuplai daya untuk grid furnace dengan menggunakan line transmisi lainnya dari transmisi Larona-Plant site. Semua generator pada Unit PLTA Balambano dan PLTA Karebbe digunakan untuk menyuplai grid Furnace dengan menggunakan transmisi

Balambano-Plant site. Tabel 3.1 berikut ini adalah data kapasitas pembangkit listrik tenaga air di PT Vale Indonesia.

Tabel 3.1 Kapasitas PLTA di PT. Vale Indonesia

Unit Pembangkit	Larona	Balambano	Karebbe
Manufaktur	GE	GE	GE
Jumlah Generator	3	2	2
Rating Generator	85 MVA	80.6 MVA	78 MVA
Rating Frekuensi	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Rating Tegangan	11 kV	11 kV	11 kV
Pf	0.8	0.85	0.85
Pole	22	28	30
RPM	272.73	214.3	200

Untuk data reaktansi dari generator PLTA dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Data Reaktansi Generator PLTA

Reaktansi		Unit Pembangkit		
		Larona	Balambano	Karebbe
Direct-axis synchronous reactance unsaturated	X _{du}	0.995	0.99	1.05
Direct-axis transient reactance saturated	X' _d	0.19	0.22	0.31
Direct-axis transient reactance unsaturated	X' _{du}	0.24	0.26	0.33
Direct-axis subtransient reactance saturated	X'' _d	0.12	0.14	0.18
Direct-axis subtransient reactance unsaturated	X'' _{du}	0.15	0.175	0.25
Quadrature-axis synchronous reactance	X _q	0.65	0.63	0.66
Quadrature-axis subtransient reactance saturated	X'' _{qu}		0.19	

Tabel 3.2 Data Reaktansi Generator PLTA (lanjutan)

Reaktansi		Unit Pembangkit		
		Larona	Balambano	Karebbe
Quadrature-axis subtransient reactance unsaturated	X"qu	0.13	0.24	0.22
Negative sequence reactance	X2	0.14	0.21	0.24
Zero sequence reactance	X0	0.046	0.05	0.12

Dalam analisa transien juga diperlukan data inerti dari generator. Data momen inerti generator diatas dapat dilihat pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Data momen inerti pembangkit

Momen Inersia		Unit Pembangkit		
		Larona	Balambano	Karebbe
Generator	kg	1400000kgm ²	2595Tm ²	2500 Tm ²
Turbine	kg	11134 kgm ²	30.5 Tm ²	30 Tm ²
Total	kg	1411134kgm ²	2625.5 Tm ²	2530 Tm ²

Inerti dari generator dan turbin dapat dicari dengan menggunakan rumus berikut ini :

$$H = \frac{5.48 \times 10^{-9} \times \omega R^2}{MVA}$$

dengan :

ωR^2 = momen inersia (kgm²)

MVA= rating generator

3.3.2 Sistem Distribusi

Sistem Distribusi yang digunakan PT Vale Indonesia ialah sistem distribusi radial. Level tegangan yang digunakan untuk grid Furnace ialah 150 kV, 33kV, 527V. Level tegangan untuk grid Auxiliary ialah 150 kV, 11kV, 3.3kV dan 380 V. Data trafo yang ada pada PT Vale Indonesia dapat dilihat pada tabel 3.4.

Tabel 3.4 Data trafo yang digunakan pada PT Vale Indonesia

Data Trafo				
ID	Vprimer	Vsec	Daya (MVA)	Type
UT-11	11	150	70/78.4	ONAN/ONAF
UT-12	11	150	70/78.5	ONAN/ONAF
UT-13	11	150	70/78.6	ONAN/ONAF
T1-B	11	150	83/93	ONAN/ONAF
T2-B	11	150	83/93	ONAN/ONAF
T1-K	11	150	84	ONAN/ONAF
T2-K	11	150	84	ONAN/ONAF
MT21	150	33	120/150	ONAN/ONAF
MT22	150	33	120/150	ONAN/ONAF
MT23	150	33	120/150	ONAN/ONAF
MT24	150	33	80/90	ONAN
MT25	150	33	80/90	ONAN
A2T04	33	0.527-2.401	116	OFWF
A2T11	33	0.527-2.402	116	OFWF
A2T05	33	0.527-2.403	116	OFWF
A2T10	33	0.527-2.404	116	OFWF
DCL1-T1	33	3.45	19	ONAN
DCL1-T2	33	3.45	24	ONAN
DCL2-T1	11	3.45	19	ONAN
DCL2-T2	11	3.45	25	ONAN
A2T01	33	3.3	12/16	ONAN/ONAF
A2T13	33	3.3	12/16	ONAN/ONAF
R2T05	33	3.3	16/20	ONAN

Tabel 3.4 Data trafo yang digunakan pada PT Vale Indonesia (lanjutan)

Data Trafo				
ID	Vprimer	Vsec	Daya (MVA)	Type
A2T12	33	3.3	16/18	ONAN/ONAF
R2BT1	33	11	14/15.68	ONAN
TT21	150	11	60/67.2	ONAN
TT22	150	11	60/67.2	ONAN

3.3.3 Data Beban

Berikut ini tabel data beban untuk grid Furnace dan beban pada feeder 11 kV Auxiliary.

Tabel 3.5 Data Beban

No	Grid	Feeder	Daya (MW)
1	FURNACE	R1F1	63.2
2		R1F2	85.1
3		R2F3	74
4		R2F4	79.9
5		R1S1	0.4
6	AUXILIARY	B17S01	
7		B17S02	3.785
8		B17S03	3.801
9		B17S06	7.799
10		B18S06	6.39
11		B18S07	5.046
12		B12S09	8.331
13		B13S03	1.996
14		B13S05	2.002
15		B10S05	1.871
16		B10S02	2.117
17		B10S03	0.261
18		B2S05	1.014

3.3.4 Data Load Flow

Berikut ini data kondisi tegangan dari hasil load flow dari single line diagram.

Tabel 3.6 Kondisi tegangan tiap bus hasil load flow

ID Bus	Tegangan nominal (kV)	Tegangan saat Load Flow (%)
A11	150	100.358
A12	150	101.917
A21	150	99.849
A22	150	102.207
A31	150	102.207
B2	11	101.469
B10	11	100.13
B12	11	101.469
B13	11	100.13
B17	11	100.13
B18	11	101.469
B8	3.3	99.930
R1	3.3	99.930
R2	3.3	99.930
R3	3.3	99.930
R4	3.3	99.930
R6	3.3	99.930
R11	33	101.265
R21	33	100.105

3.4 Data Kontrol Generator PT. Vale Indonesia

3.4.1 Model Exciter

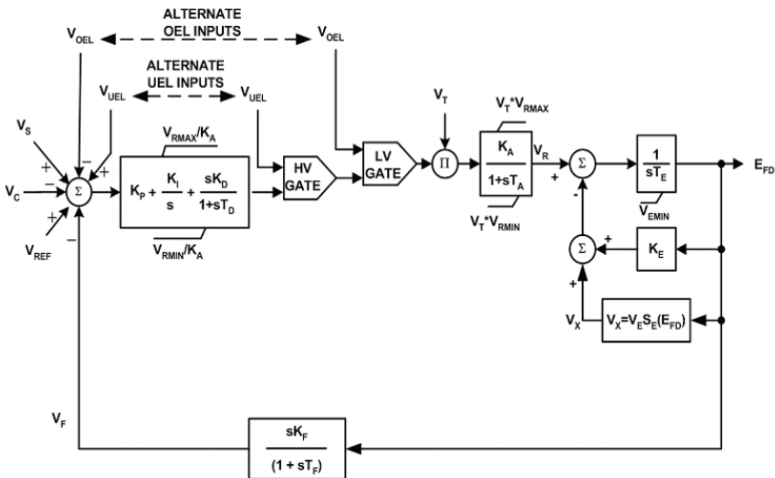
Generator pada PT. Vale Indonesia menggunakan sistem *self excitation* dengan menggunakan suplai dari tegangan terminal. Oleh karena itu saat simulasi tipe *exciter* yang digunakan ialah DC4B.

Tabel 3.7 Parameter *exiter* tipe DC4B

Parameter	Definition	Unit
VR_{max}	Maximum controller output in pu	p.u.
VR_{min}	Minimum controller output in pu	p.u.
VE_{min}	Exiter minimum output voltage in pu	p.u.
VOEL	Over excitation limiter output	p.u.

Tabel 3.7 Parameter *exciter* tipe DC4B (lanjutan)

Parameter	Definition	Unit
VUEL	Under excitation limiter output	p.u.
E1	Exciter flux at SE1 in pu	p.u.
SE1	Saturation factor at E1	p.u.
E2	Exciter flux at SE2 in pu	p.u.
SE2	Saturation factor at E2	p.u.
KP	Regulator proportional gain in PU	p.u.
KI	Regulator integral gain in PU	p.u.
KD	Regulator derivative gain in PU	p.u.
KF	Rate feedback gain in pu	p.u.
KE	Exciter field proportional constant	p.u.
KA	Regulator output gain	p.u.
TA	Regulator output time constant in second	Sec
TF	Rate feedback time constant in second	Sec
TD	Regulator derivative filter time constant in second	Sec
TE	Exciter field time constant	Sec
TR	Regulator input filter time constant in seconds	Sec



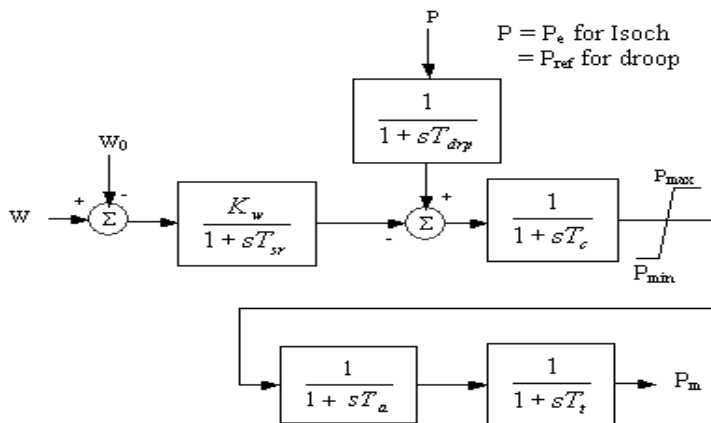
Gambar 3.2 Diagram Blok *Exciter* Tipe DC4B

3.4.2 Model Governor

Model governor yang digunakan untuk simulasi adalah tipe GP. Parameter yang ada pada governor tipe GP dapat dilihat pada tabel 3.8.

Tabel 3.8 Parameter *governor* tipe GP

Parameter	Definition	Unit
Mode	Droop or Isoch	
Dr droop	Steady-state speed droop	%
Pmax	Maximum shaft power	MW
Pmin	Minimum shaft power	MW
Ta	Actuator time constant	Sec.
Tc	Governor reset time constant	Sec.
Tdrp	Load sensor time constant	Sec.
Tsr	Speed relay time constant	Sec.
Tt	Turbine relay time constant	Sec.

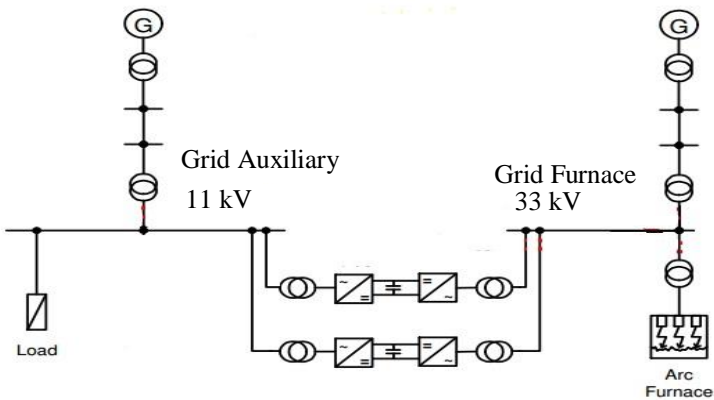


Gambar 3.3 Blok Diagram *Governor* tipe GP

3.5 HVDC

Pada sistem kelistrikan PT. Vale Indonesia terdapat 2 dua buah DC Link (2x18 MW) yang menghubungkan grid Auxiliary(11 kV) dengan grid Furnace (33 kV). Selain untuk transfer daya antara kedua grid, DC

link ini juga berfungsi sebagai STATCOM. DC Link ini juga berfungsi sebagai penyeimbang beban 3 phasa pada Grid Furnace (33 kV) dalam bentuk kompensasi arus urutan negative. Kontroler dari DC Link mengatur aliran daya aktif tergantung dari kebutuhan daya pada sisi 11 kv (*auxiliary*).



Gambar 3.4 Gambaran sederhana interkoneksi menggunakan HVDC di PT. Vale Indonesia.

BAB IV

SIMULASI DAN ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI PT. VALE INDONESIA

4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan PT. Vale Indonesia

Sistem kelistrikan PT. Vale Indonesia dimodelkan dalam single line diagram berdasarkan data-data yang didapatkan dapat dilihat pada lampiran. Setelah melakukan pemodelan sistem dilanjutkan dengan melakukan simulasi transient stability menggunakan software ETAP 12.6 berdasarkan kasus-kasus yang dapat mengganggu kestabilan sistem. Pada tugas akhir ini akan dianalisis respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan sistem saat terjadi *generator outage*, *motor starting* dan gangguan hubung singkat. Single line diagram dari sistem kelistrikan PT. Vale Indonesia dapat dilihat pada lampiran.

4.2 Total Pembangkitan dan Beban PT. Vale Indonesia

Berikut ini total pembangkitan pada PT. Vale Indonesia ketika semua Unit PLTA beroperasi.

Tabel 4.1 Total pembangkitan dan beban di PT. Vale Indonesia

Keterangan	MW	MVAR	MVA	%PF
Source Swing Bus	346.812	176.075	388.948	89.17 Lag
Source Non-Swing Bus	-	-	-	-
Total Demand	346.812	176.075	388.948	89.17 Lag
Total Motor Load	37.889	8.442	38.818	97.61 Lag
Total Static Load	303.412	98.212	318.911	95.14 Lag
Apparent Losses	5.511	66.847		

4.3 Studi Kasus Analisa Transien

Pada analisis stabilitas transien di PT. Vale Indonesia akan disimulasikan beberapa kasus gangguan yang dapat mengganggu stabilitas sistem sebagai berikut :

- a. *Hubung singkat*
 Pada kasus hubung singkat akan disimulasikan pada setiap level tegangan :
 - Tegangan 11 kV : bus B17
 - Tegangan 3,3 kV : bus R6
- b. *Motor Starting*
 Pada kasus ini disimulasikan saat terjadi starting motor terbesar pada sistem (Motor Air Compressor).
- c. *Generator Outage*
 Pada kasus ini akan dilakukan simulasi lepas generator pada salah satu generator yang menyuplai bagian Furnace. Kemudian lepas dua generator
- d. *Generator Outage dengan Interkoneksi Menggunakan Trafo*
 Pada kasus ini akan dilakukan lepas 2 generator dengan sistem lama yaitu sistem yang menggunakan trafo untuk interkoneksi grid Furnice dengan grid Auxiliary.

Penjelasan lebih lengkap tentang studi kasus yang disimulasikan dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Studi kasus kesatbilan transien

Kasus	Keterangan	Waktu (s)
Hubung singkat		
Bus 3,3 kV	Hubung singkat pada bus R6	2
	CB 44 Open	2,2
Bus 11 kV	Hubung singkat pada bus B17	2
	CB 13 Open	2,2
Motor Starting		
MS 3500 HP	Motor Tuyere Air Compressor 1 (3500 HP)	
Generator Outage		
Gen Out Larona#2	Generator Larona #2 Out	2
Gen Out Balambano#1 dan Balambano#2	Generator Balambano#1 Out dan Balambano#2 Out	2

Tabel 4.2 Studi kasus kesatbilan transien (lanjutan)

Kasus	Keterangan	Waktu (s)
Generator Outage dengan interkoneksi trafo		
Gen Out Balambano#1 dan Balambano#2	Gen Out Balambano#1 dan Balambano#2	2

Dari kasus diatas, untuk kasus hubung singkat bus yang digunakan untuk pengamatan stabilitas sistem ialah :

- Bus A11 : bus yang mewakili bus terdekat dengan generator pada tegangan 150 kV untuk grid Auxiliary
- Bus A12 dan A31 : bus yang mewakili bus terdekat dengan generator pada tegangan 150 kV untuk grid Furnace
- Bus B10 : bus yang mewakili bus 11 kV

Untuk kasus motor starting bus yang diamati untuk analisa kestabilan ialah :

- Bus R6 : bus yang terhubung dengan motor
- Bus A11 : bus yang mewakili bus terdekat dengan generator pada tegangan 150 kV untuk grid Auxiliary
- Bus A12 dan A31 : Bus yang mewakili bus terdekat dengan generator pada tegangan 150 kV untuk grid Furnace

Untuk kasus lepas generator, bus yang diamati untuk analisa kestabilan ialah :

- Bus A11 : bus yang mewakili bus terdekat dengan generator pada tegangan 150 kV untuk grid Auxiliary.
- Bus A12 dan A31 : bus yang mewakili bus terdekat dengan generator pada tegangan 150 kV untuk grid Furnace
- Bus B10 : bus yang mewakili bus 11 kV

Selanjutnya langkah-langkah yang akan dilakuka dalam analisa kestabilan transien adalah sebagai berikut :

- Mengamati respon frekuensi dan tegangan pada bus yang sudah ditentukan serta sudut rotor dari generator.
- Menganalisa apakah respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor kembali stabil atau tidak sesuai dengan standar yang diijinkan.

- c. Jika sistem belum mampu mencapai kondisi stabil yang sesuai dengan standar maka dilakukan mekanisme pelepasan beban (*load shedding*).

4.4 Simulasi dan analisis kestabilan transien

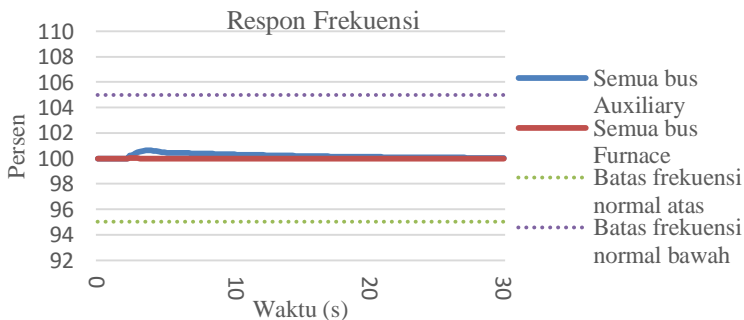
Dalam sub-bab ini akan dijelaskan mengenai hasil simulasi dan analisis dari setiap kasus yang disimulasikan.

4.4.1 Simulasi kestabilan transien untuk kasus hubung singkat (*Short Circuit*)

Kasus hubung singkat akan dilakukan pada level tegangan 3,3 kV dan 11 kV.

4.4.1.1 Studi Kasus Hubung Singkat pada bus 3,3 kV

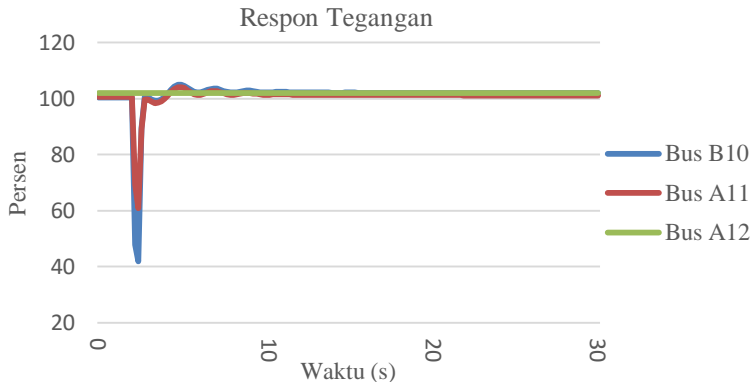
Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus R6 yang mewakili profil tegangan 3,3 kV. Gangguan hubung singkat disimulasikan pada detik ke-2 kemudian pada detik 2,2 CB 44 open untuk mengatasi gangguan.. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.1, gambar 4.2 dan gambar 4.3.



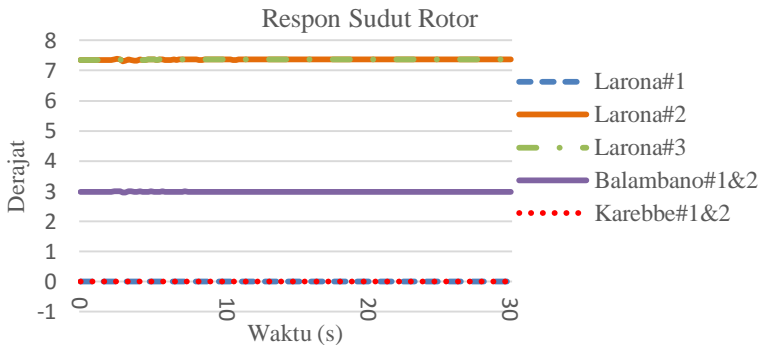
Gambar 4.1 Respon frekuensi saat gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus R6

Pada gambar 4.1 dapat dilihat respon frekuensi pada sisi Auxiliary terjadi perubahan frekuensi, dan ketika CB 44 *open* frekuensi mencapai 100,628% . Sedangkan pada sisi Furnace frekuensi berubah

menjadi 100,003% saat terjadi gangguan, terlihat perubahan frekuensi sangat sedikit yaitu 0,003% . Frekuensi pada grid Auxiliary dan grid Furnace masih dalam batas frekuensi normal menurut IEEE Std C37.106-2003 untuk *hydraulic turbine* yaitu 95-105%.



Gambar 4.2 Respon tegangan saat gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus R6



Gambar 4.3 Respon sudut rotor saat gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus R6.

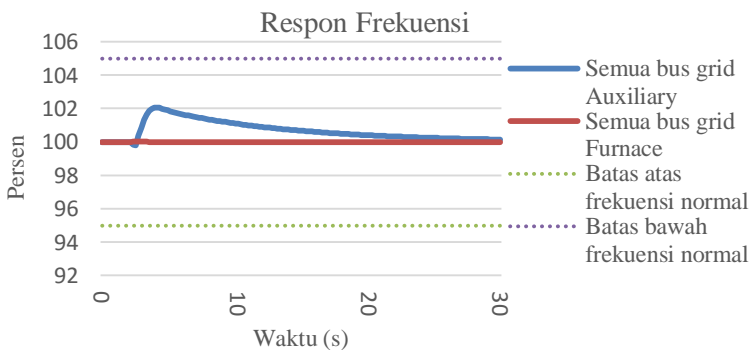
Gambar 4.2 adalah gambar respon tegangan saat terjadi gangguan tegangan pada bus R6. Pada saat terjadi hubung singkat tegangan pada bus B10(mewakili tegangan 11 kV) turun dari tegangan awal 100,415% menjadi 42% dan setelah gangguan terisolir tegangan steady state pada 101,98%. Dan respon tegangan pada bus A11(mewakili

tegangan 150kV grid Auxiliary) pada saat terjadi hubung singkat tegangan bus A11 turun dari tegangan awal 100,48% menjadi 60,89% dan setelah gangguan terisolir tegangan pada bus A11 steady state pada 101,2%. Sedangkan pada bus A12(mewakili tegangan 150kV grid Furnace) dengan tegangan awal 101,97% saat terjadi gangguan turun menjadi 101,85% kemudian naik lagi setelah gangguan terisolir menjadi 101,98%. Dapat dilihat bahwa ketika terjadi gangguan tegangan pada sisi Furnace hanya sedikit mengalami perubahan. Dari hasil simulasi diatas dapat dilihat bahwa saat terjadi gangguan tegangan sistem kembali stabil dan dengan tegangan sesuai standar PLN.

Respon sudut rotor generator dapat dilihat pada gambar 4.3. Dari gambar dapat dilihat sudut rotor generator Larona#, Karebbe#1 dan Karebbe#2 berada pada sudut 0° . Balambano#1 dan Balambano#2 dengan sudut rotor awal $2,98^\circ$ saat terjadi gangguan meningkat menjadi 3° kemudian kembali *steady state* pada sudut $2,98^\circ$. Sudut rotor generator awal $7,35^\circ$ kemudian mengalami perubahan ketika terjadi gangguan kemudian *steady state* pada sudut $7,36^\circ$.

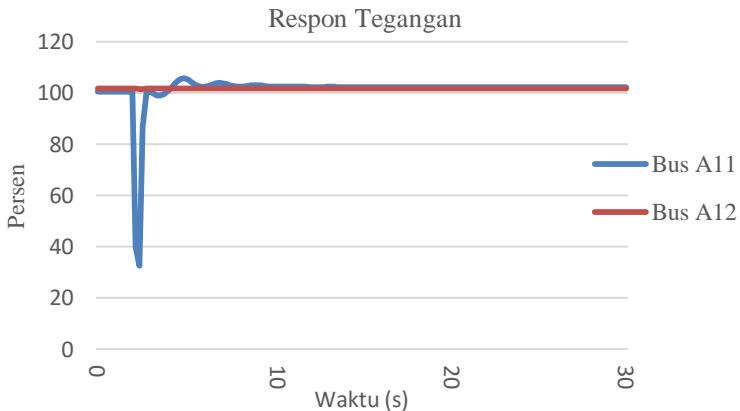
4.4.1.2 Studi Kasus Hubung Singkat pada bus 11 kV

Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus B17 yang mewakili profil tegangan 11 kV. Gangguan hubung singkat disimulasikan pada detik ke-2 kemudian pada detik 2,2 CB 13 open untuk mengatasi gangguan.. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.4 dan gambar 4.5 dan gambar 4.6.



Gambar 4.4 Respon frekuensi saat gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus B17

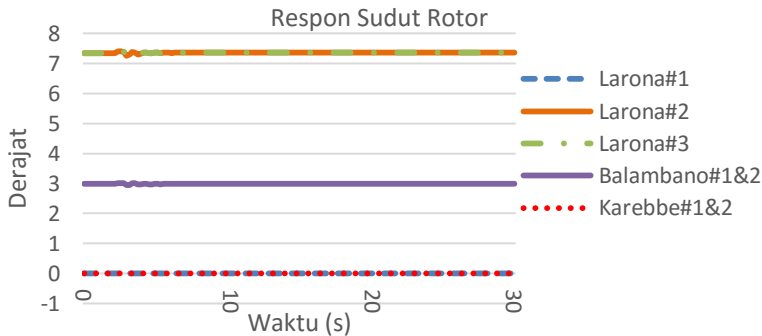
Pada gambar 4.4 dapat dilihat respon frekuensi pada sisi Auxiliary terjadi perubahan frekuensi pada saat terjadi gangguan pada detik ke-2 yaitu turun menjadi 99,81% kemudian meningkat ketika CB 13 *open* sampai 102,065% namun masih dalam standar IEEE Std C37.106-2003 untuk *hydrolic turbine* yaitu 95-105%. Sedangkan pada sisi Furnace pada saat gangguan frekuensi naik menjadi 100,014% kemudian turun lagi menjadi 100,005%.



Gambar 4.5 Respon tegangan saat gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus B17

Gambar 4.5 adalah respon tegangan hasil simulasi dengan kasus 3 fasa pada bus B17. Dari gambar 4.5 dapat dilihat tegangan pada Bus A11 pada saat terjadi gangguan turun menjadi 32,6% kemudian setelah gangguan terisolasi (CB 13 open) tegangan pada bus A11 steady state pada tegangan 102,3% dan masih sesuai dengan standar tegangan PLN. Sedangkan pada Bus A12 dengan tegangan awal 101,735% pada saat terjadi gangguan turun menjadi 101,597 dan kembali pada tegangan 101,735% setelah gangguan hilang.

Respon sudut rotor generator saat gangguan hubung singkat pada bus B17 dapat dilihat pada gambar 4.6. Dari gambar dapat dilihat sudut rotor generator Laronas#, Karebbe#1 dan Karebbe#2 berada pada sudut 0°. Balambano#1 dan Balambano#2 dengan sudut rotor awal 2,98° saat terjadi gangguan meningkat menjadi 3,01° kemudian kembali *steady state* pada sudut 2,98°. Sudut rotor generator awal 7,35° kemudian mengalami peningkatan sampai 7,41 ketika terjadi gangguan kemudian *steady state* pada sudut 7,36°.



Gambar 4.6 Respon sudut rotor saat gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus B17

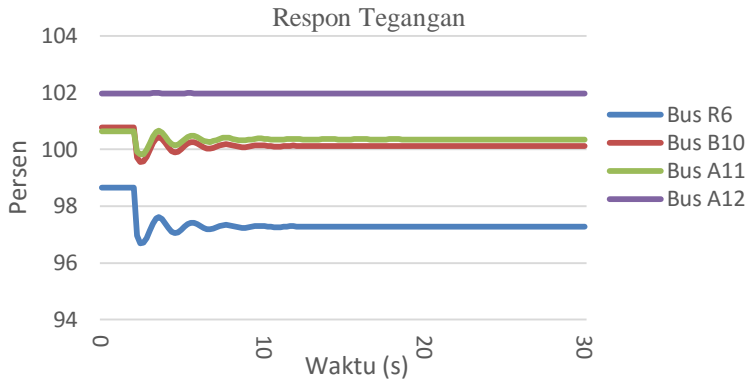
4.4.2 Simulasi kestabilan transien dengan kasus motor starting

Pada sub bab ini akan membahas simulasi kestabilan transien untuk kasus motor starting.

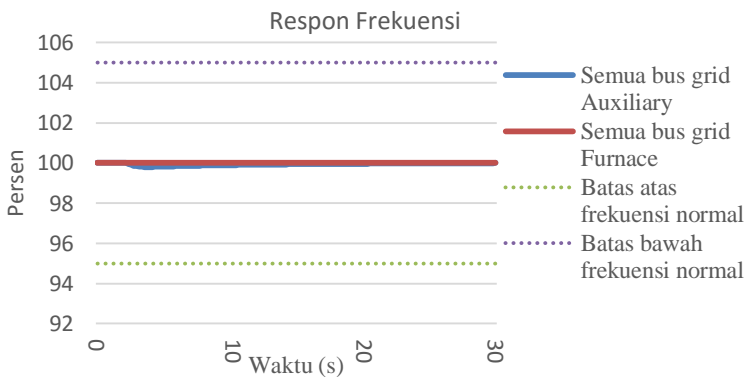
4.4.2.1 Studi kasus motor starting 3500 HP

Pada kasus ini akan membahas respon tegangan saat motor *Air Compressor* #1 dengan kapasitas 3500 HP start. Motor tersebut adalah motor dengan daya terbesar yang ada pada PT. Vale Indonesia. Motor starting pada detik ke-2. Hasil simulasi motor starting dapat dilihat pada gambar 4.7 dan gambar 4.8.

Gambar 4.7 adalah respon tegangan pada saat motor *Air Compressor* #1 starting. Terlihat tegangan pada bus R6 dengan tegangan awal 98,66% turun menjadi 96,69% kemudian *steady state* pada tegangan 97,28%. Pada bus B10 (bus yang mewakili 11 kV) pada saat motor start tegangan turun dari 100,77% menjadi 99,55% dan kembali *steady state* pada tegangan 100,117%. Tegangan pada bus A11(bus yang mewakili tegangan 150kV grid Auxiliary) tegangan turun dari tegangan 100,63% menjadi 99,82% dan kembali *steady state* dengan tegangan 100,35%. Pada bus A12 (bus yang mewakili tegangan 150 kV pada grid Furnace) dengan tegangan awal 101,97% turun menjadi 101,96% kemudian kembali pada tegangan 101,97%. Dari hasil simulasi semua bus pada grid Auxiliary mengalami perubahan tegangan namun masih dalam standar PLN. Sedangkan tegangan pada bagian grid Furnace hanya mengalami penurunan sebesar 0,01% saat motor starting.



Gambar 4.7 Respon tegangan pada saat simulasi motor starting



Gambar 4.8 Respon frekuensi saat simulasi motor starting

Gambar 4.8 adalah hasil respon frekuensi ketika motor *Air Compressor#1* start. Ketika motor start frekuensi pada Grid Auxiliary turun dan mencapai titik 99,796% dan masih dalam batas normal frekuensi menurut standar IEEE std.c103-2003 untuk hidrolik turbin. Sedangkan pada Grid Furnace tidak mengalami perubahan.

4.4.3 Simulasi kestabilan transien untuk kasus *generator outage*

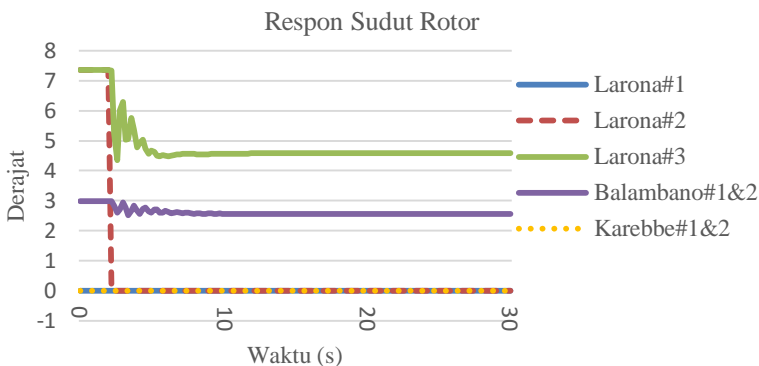
Pada sub bab ini akan membahas kestabilan transien dengan kasus lepas generator (*generator outage*). Generator yang disimulasikan

trip adalah salah satu generator yang menyuplai grid Furnace, kemudian melepas dua generator yang menyuplai grid Furnace.

4.4.3.1 Studi kasus lepas generator Larona#2

Pada kasus ini akan ditampilkan respon frekuensi, respon tegangan dan sudut generator yang mewakili grid Auxiliary dan grid Furnace. Pelepasan generator disimulasikan pada detik ke-2. Hasil simulasi ditampilkan pada gambar 4.9, gambar 4.10 dan gambar 4.11.

Respon sudut generator dapat dilihat pada gambar 4.9. Terlihat pada gambar bahwa saat generator Larona#2 lepas sudut generator Larona#2 berubah dari $7,35^\circ$ menjadi 0° , sudut generator Larona#3 berubah dari $7,35^\circ$ menjadi $4,59^\circ$, sudut generator Balambano#1 dan Balambano#2 berubah dari $2,9^\circ$ menjadi $2,49^\circ$, sedangkan generator Larona#1, Karebbe#1 dan Karebbe#2 tetap berada pada 0° .

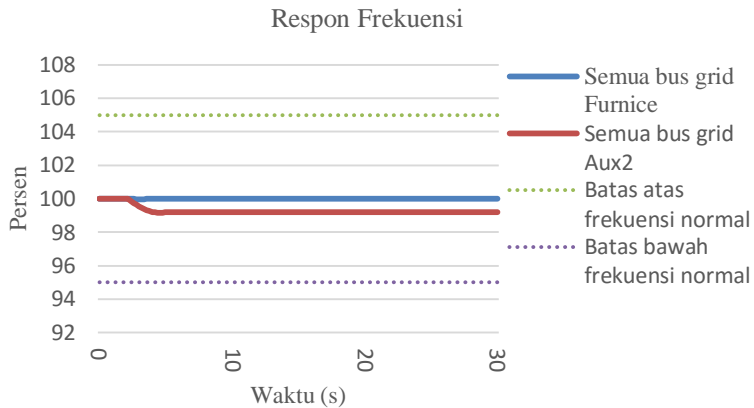


Gambar 4.9 Respon sudut generator saat generator Larona#2 lepas

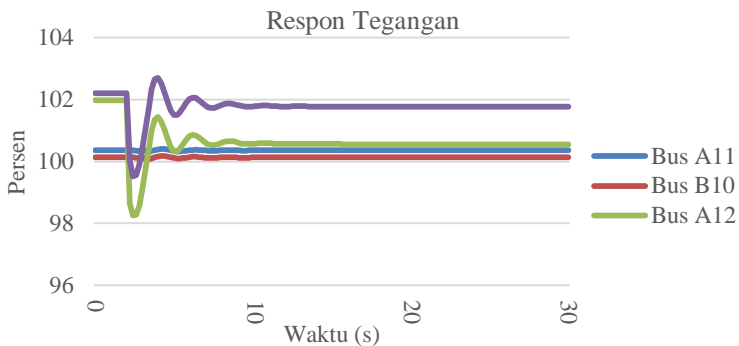
Gambar 4.10 adalah gambar respon frekuensi saat terjadi pelepasan generator Larona#2 pada detik ke-2. Dari gambar terlihat saat detik ke-2, frekuensi pada semua bus di grid Furnace berubah dari 100% menjadi 99,2087%, sedangkan frekuensi pada semua bus di grid Auxiliary pada detik ke-2 turun dari 100% menjadi 99,9662% kemudian steady pada frekuensi 100%.

Respon tegangan untuk kasus lepas generator Larona#2 dapat dilihat pada gambar 4.11. Saat detik ke-2 tegangan pada Bus A12 turun dari 101,972% menjadi 98,2586% dan *steady* pada tegangan 100,558%. Saat generator lepas tegangan di Bus A31 turun dari 102,207% menjadi

99,52% dan *steady* pada tegangan 101,77%. Sesaat setelah generator lepas tegangan pada B10 berubah dari 100,13% menjadi 100,09% kemudian *steady* pada 100,13% dan tegangan pada A11 berubah dari 100,358% menjadi 100,321% dan *steady* pada 100,358%.



Gambar 4.10 Respon frekuensi saat generator Larona#2 lepas



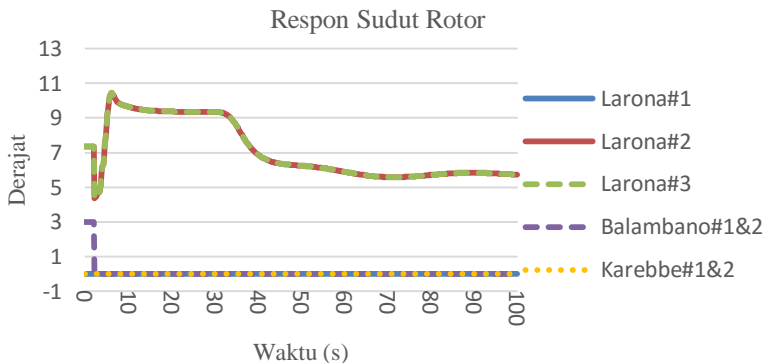
Gambar 4.11 Respon tegangan saat generator Larona#2 lepas

Dari hasil simulasi diatas dapat disimpulkan bahwa saat terjadi lepas generator Larona#2 sistem masih dapat stabil kembali. Dan lepasnya generator Larona#2 tidak memberikan dampak yang berarti pada grid Auxiliary.

4.4.3.2 Studi kasus lepas generator Balambano#1 dan Balambano#2

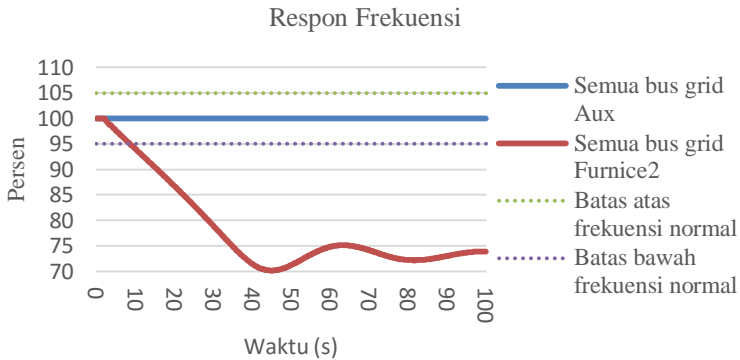
Pada sub bab ini akan membahas simulasi transien dengan kasus melepas dua generator yaitu Balambano#1 dan Balambano#2. Pelepasan kedua generator dilakukan pada detik ke-2. Hasil dari simulasi dapat dilihat pada gambar 4.12, gambar 4.13 dan gambar 4.14.

Gambar 4.12 adalah respon generator hasil simulasi dari lepas generator Balambano#1 dan Balambano#2 pada detik ke-2. Dari gambar terlihat setelah detik ke-2 sudut generator Larona#2 dan Larona#3 selalu berubah-ubah. Pada detik ke-2 sudut rotor generator Balambano#1 dan Balambano#2 berubah dari $2,98^\circ$ menjadi 0° , sedangkan sudut generator Larona#1, Karebbe#1 dan Karebbe#2 tetap pada 0° .

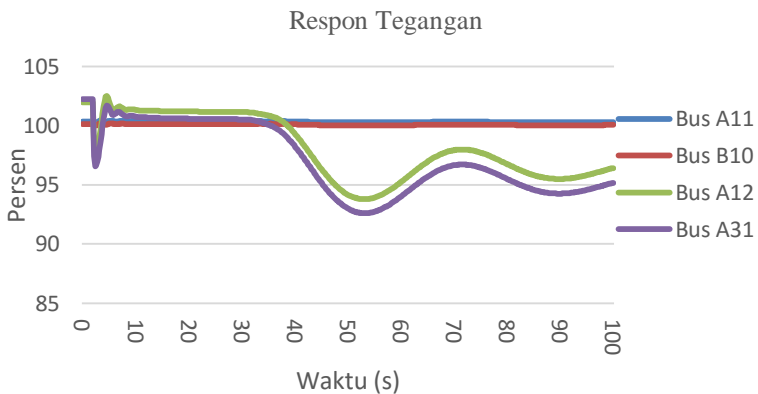


Gambar 4.12 Respon sudut rotor saat lepas generator Balambano#1 dan Balambano#2

Respon frekuensi untuk kasus lepas generator Balambano#1 dan Balambano#2 dapat dilihat pada gambar 4.13. Pada gambar dapat dilihat setelah detik ke-2 frekuensi pada semua bus di grid Furnace terus turun sampai 70,41%, sedangkan frekuensi pada semua bus di grid Auxiliary hanya berubah dari 100% menjadi 99,9682%. Respon frekuensi pada grid Furnace diluar dari standar IEEE Std C37.106-2003 yaitu 95%-105%, maka perlu pengurangan beban pada sisi grid Furnace namun grid Furnace hanya menyuplai tanur peleburan sehingga pengurangan beban cukup dengan mengatur daya yang dilakukan langsung oleh operator yang mengawasi tanur. Sedangkan pada sisi grid Auxiliary saat terjadi lepas generator hanya mengalami sedikit perubahan frekuensi. Sehingga mekanisme pelepasan beban pada sistem tidak perlu dilakukan.



Gambar 4.13 Respon frekuensi saat lepas generator Balambano#1 dan Balambano#2



Gambar 4.14 Respon tegangan saat lepas generator Balambano#1 dan Balambano#2

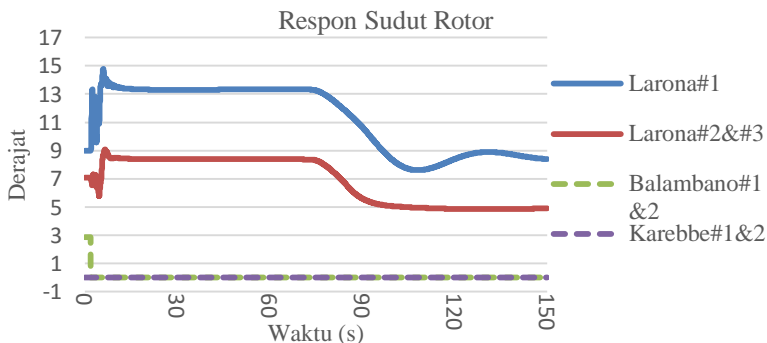
Respon tegangan untuk kasus lepas generator Balambano#1 dan Balambano#2 dapat dilihat pada gambar 4.14. Pada gambar terlihat setelah detik ke-2 tegangan pada Bus A12 dan A13 terus berubah-ubah tegangan turun sampai kurang dari 95%. Sedangkan pada Bus A11 dengan tegangan awal 100,358% kemudian berisolasi pada detik ke-2 turun sampai ke tegangan 100,248% kemudian steady pada tegangan 100,35%. Dan pada bus B10 dengan tegangan awal 100,13% kemudian berisolasi pada detik ke-2 turun sampai ke tegangan 99,9987%

dan steady pada tegangan 100,13%. Dari hasil dapat dilihat kasus lepas generator Balambano#1 dan Balambano#2 membuat tegangan tidak stabil pada grid Furnace sedangkan tidak terlalu mempengaruhi tegangan bus pada grid Auxiliary.

4.4.4 Simulasi kestabilan transien dengan kasus *generator outage* dengan interkoneksi grid Furnace dan grid Auxiliary menggunakan trafo

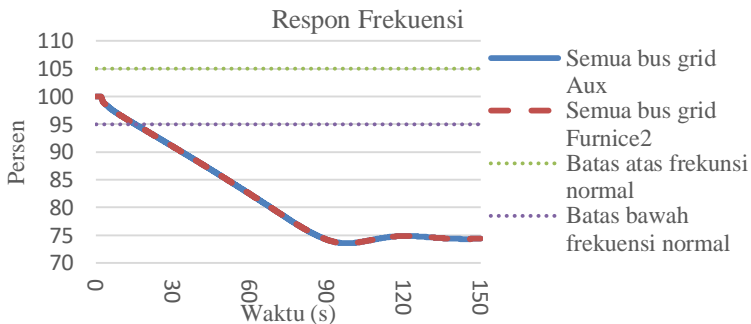
Pada sub bab ini akan membahas simulasi kestabilan transien pada sistem dengan menggunakan konfigurasi lama yaitu interkoneksi antara grid Furnace dengan grid Auxiliary menggunakan trafo. Simulasi ini dilakukan untuk membandingkan dengan hasil simulasi sebelumnya dengan sistem yang menggunakan DC Link untuk interkoneksi antara grid Furnace dengan grid Auxiliary. Simulasi yang dilakukan ialah simulasi yang sama pada sub bab 4.4.3.2 yaitu lepas generator Balambano#1 dan Balambano#2 pada detik ke-2. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.15, gambar 4.16 dan gambar 4.17.

Respon sudut generator dapat dilihat pada gambar 4.15. Dari hasil respon dibandingkan dengan hasil respon sudut generator pada saat menggunakan DC Link pada gambar 4.12. Terlihat perbedaan pada respon sudut generator Larona#1. Sudut generator pada Larona #1 pada saat terjadi pelepasan generator terus berubah-ubah atau tidak stabil, sedangkan pada saat menggunakan DC Link sudut generator pada generator Larona#1 tidak mengalami perubahan saat terjadi pelepasan beban.

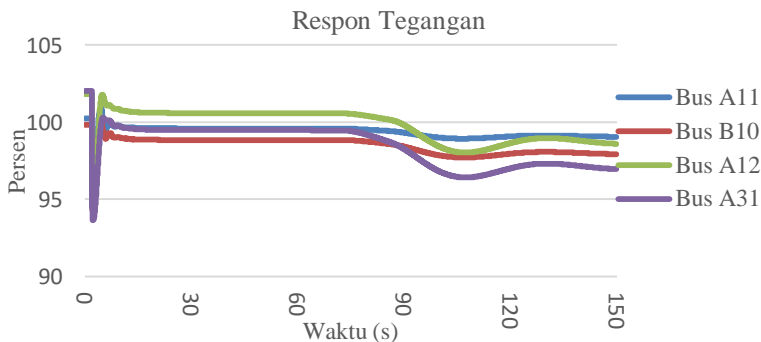


Gambar 4.15 Respon sudut rotor saat lepas generator Balambano#1 dan Balambano#2 pada sistem dengan interkoneksi menggunakan trafo

Respon frekuensi saat terjadi pelepasan beban dapat dilihat pada gambar 4.16. Dari hasil simulasi sistem yang diinterkoneksi dengan menggunakan trafo frekuensi pada grid Auxiliary sama dengan frekuensi pada grid Furnace. Sehingga saat terjadi lepas generator, frekuensi grid Auxiliary juga menjadi berada pada batas frekuensi normal atau tidak sesuai standar IEEE Std C37.106-2003. Berbeda dengan hasil simulasi pada sistem yang menggunakan interkoneksi dengan menggunakan DC Link (gambar 14.11) dimana saat terjadi lepas generator frekuensi pada grid Auxiliary tetap pada batas normal atau sesuai dengan standar IEEE Std C37.106-2003.



Gambar 4.16 Respon frekuensi saat lepas generator Balambano#1 dan Balambano#2 pada sistem dengan interkoneksi menggunakan trafo



Gambar 4.17 Respon tegangan saat lepas generator Balambano#1 dan Balambano#2 pada sistem dengan interkoneksi menggunakan trafo

Respon tegangan saat lepas generator Balambano#1 dan Balambano#2 pada sistem yang memakai trafo untuk interkoneksi dapat dilihat pada gambar 4.17. Dari hasil simulasi terlihat setelah lepas generator (detik ke-2) tegangan pada bus A11 dan bus B10 (bus yang berada pada grid Auxiliary) juga mengalami perubahan. Pada bus A11 dengan tegangan awal 100,246 % turun menjadi 95,07% pada detik ke-2,361 kemudian naik kembali menjadi 99%. Setelah generator lepas tegangan pada bus A10 turun dari 99,83% menjadi 94,014% pada detik ke-2,361 kemudian naik kembali menjadi 97%.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis pada tugas akhir ini dapat ditarik beberapa kesimpulan yaitu:

1. Pada kasus hubung singkat dengan level tegangan 3,3kV (bus R6) setelah gangguan terisolasi (CB *open*) frekuensi pada sisi Auxiliary meningkat sampai 0.628% , sedangkan pada grid Furnace frekuensi naik sebesar 0,003%
2. Pada kasus hubung singkat pada level tegangan 11kV (bus B17) pada sisi Grid Auxiliary frekuensi turun ketika terjadi gangguan menjadi 99,81%, kemudian meningkat ketika CB 13 open menjadi 102,065%. Pada grid Furnice frekuensi naik sebesar 0,014%.
3. Pada kasus motor starting 3500HP tegangan pada bus R6 (bus 3,3 kV) berubah dari 98,66% menjadi 96,69% kemudian steady state pada tegangan 97,28% sedangkan pada bus B10 (bus 11kV) berubah dari 100,77% menjadi 99,55% dan steady state pada 100,117% dan pada bus A11(bus 150kV) berubah dari 100,63% menjadi 99,82% dan steady state pada 99,8% . Sedangkan Tegangan pada A12 dari tegangan awal 101,97% menjadi 101,96% dan kembali steady state pada tegangan 101,97%.
4. Pada kasus lepas generator Larona#2 frekuensi pada grid Furnace mengalami penurunan sampai 99,2%, sedangkan pada grid Auxiliary frekuensi hanya turun sampai titik 99,9662%.
5. Pada kasus lepas generator Balmbano#1 dan Balambano#2 frekuensi pada grid Furnice turun sampai pada frekuensi 70,41% dan diluar batas frekuensi normal menurut standar IEEE Std C37.106-2003. Sedangkan pada sisi Auxiliary frekuensi hanya turun menjadi 99,9682%
6. Pada sistem kelistrikan PT.Vale Indonesia yang sekarang ini menggunakan interkoneksi menggunakan DC Link membuat sistem kelistrikan lebih stabil. Perubahan tegangan dan frekuensi pada salah satu grid akibat gangguan tidak terlalu mempengaruhi grid lainnya.

7. Penggunaan DC Link untuk interkoneksi pada PT Vale Indonesia membuat sistim kelistrikan pada PT Vale tidak lagi membutuhkan skema pelepasan secara otomatis.

5.2 Saran

Dari hasil simulasi dan analisa maka penulis memberikan saran sebagai berikut :

1. Starting motor 3500HP mengakibatkan tegangan kedip selama 3.6 detik dan penurunan tegangan yang cukup besar pada bus 3,3 kV yang berdekatan dengan bus motor tersebut, sedapat mungkin starting motor ini dilakukan pertama kali sebelum starting motor lain pada bus yang berdekatan .

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [2] W. Stevenson dan J. J. Granger, Elements of Power System Analysis, 4th Edition, McGraw-Hill Companies Inc, 1994.
- [3] Definitions, IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and, “Definition and Classification of Power System Stability,” *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, vol. 19, p. NO. 2, 2004.
- [4] M. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, Desain Kontroller untuk Kestabilan Dinamik Sistem Tenaga Listrik, Surabaya: ITS Press, 2012.
- [5] Ontoseno. Penangsang, Diktat Kuliah Analisis Sistem Tenaga Listrik 2, Surabaya: Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [6] Chan-Ki Kim, Vijay K. Sood, Gil-Soo Jang, Seong-Joo Lim and Seok-Jin Lee, HVDC Transmission : Power Conversion Application in Power Systems, IEEE PRESS, 2009.
- [7] D. Marsudi, Operasi Sistem Tenaga Listrik, Yogyakarta: Graha Ilmu, 2006.
- [8] IEEE, “Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants,” 1987. IEEE Std C37.106-2003 (Revision of ANSI/IEEE Std 106-1987).
- [9] IEEE, “Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality,” dalam *IEEE Std 1159-1995*, 1995.
- [10] IEEE, “Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants,” dalam *IEEE Std C37.106-1987*, 1987.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIOGRAFI



Chandra Tamorron Musu terlahir sebagai anak kelima dari enam bersaudara di Pangli pada tanggal 12 Oktober 1991. Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Makale, Tana Toraja tahun 2009. Penulis melanjutkan dan menyelesaikan pendidikan diploma (D3) pada bidang Teknik Listrik Vokasi Elektro Universitas Gadjah Mada tahun 2013. Tahun 2015, penulis melanjutkan pendidikan sarjana (S1) pada bidang Teknik Sistem Tenaga Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Penulis dapat dihubungi melalui email chandramusu@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan

